IMPACTOS REPETIDOS • LA BIODIVERSIDAD BRASILEÑA, AMENAZADA

INVESTIGACION y CIENCIA

MAYO 2002
5 EURO

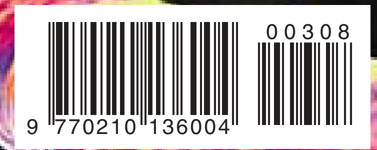
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

La lucha contra el CARBUNCO

El computador mundial

Inventario cósmico

Neurobiología del maltrato a la infancia





Mayo de 2002 Número 308

SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Jeff Johnson

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Jason Grow
8	Michael Abbey, *Photo Researchers, Inc.*
9	Cortesía de Cepheid
10-11	Bryan Christie Design
13	Brian Branch-Price, *Ap Photo*
16	Kamil Vojnar
19	Aaron Firth (*basado en el gráfico de Michael Paine*)
20-21	Don Foley; fuente: The Mistaken Extinction, por Lowell Dingus y Timothy Rowe. W. H. Freeman, 1998 (*ilustración*); fotografías: Alan Hildebrand (*cuarzo*); Walter Peredery (*conos de fractura*); Tim Culler, *Univ. de California, Berkeley*/Apollo 11 CREW/NASA (*microesférulas*); W. Alvarez/ spl/Photo Researchers, Inc. (*capa depositada*); Wendy S. Wolbach, DePaul Univ. (*hollín*)
22	Kamil Vojnar
25	Gary A. Glatzmaier y Paul H. Roberts (*simulación por ordenador*), DLR (Foto der Erde)
26	Reinhold Henkel/*Spektrum der Wissenschaft*
27	*Spektrum der Wissenschaft*/ Ch. Carrigan y F. Busse
28	Centro de Investigación de Karlsruhe
29	Sterne und Weltraum 4/2000, p. 231
30-31	Centro de Inv. de Karlsruhe
43-49	M. Tabarelli, J. de Fátima Marins y J. M.ª Cardoso da Silva
50-51	Peter Challis, Centro Smithsoniano de Astrofísica en Harvard
52-53	Roger Ressmeyer, *Corbis* (*izquierda*); WFI/Observatorio Meridional Europeo (*derecha*)
54	Michael Hauser, *Inst. Científico del Telescopio Espacial* y NASA
55	Instituto Max Planck de Física Extraterrestre
56	NASA/PSU/G. Garmire, N. Brandt *et al.*
57	Johnny Johnson; fuente: Günther Hasinger y Roberto Gilli
60-61	Stuart Bradford
62	Carol Donner
63-64	Stuart Bradford
65	Carol Donner
69	Philip Howe
71-74	XPlane
77-83	C. Alonso Jiménez y V. Moreno Burgos
84-85	Juergen Siegmann (*fotografía*); Thomas Braun, SdW (*dibujos*)
88-89	Bryan Christie Design (*ilustración*); Laboratorio Nacional Sandia (*micrografía*)
96	Sara Chen

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª José Báguena: *La lucha contra el carbunco*; Manuel Puigcerver: *Impactos repetidos*; Emilio Elizalde: *La geodinamo en el laboratorio*; M.ª Rosa Zapatero: *Inventario cósmico*; José Manuel García de la Mora: *Neurobiología del maltrato en el infancia*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; Luis Bou: *Aventuras problemáticas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045 – Fax 914 097 046

Cataluña y Baleares:
Sergio Munill
Valencia, 58 entlo. 2.ª
08015 Barcelona
Tel. y fax (34) 932 263 624

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

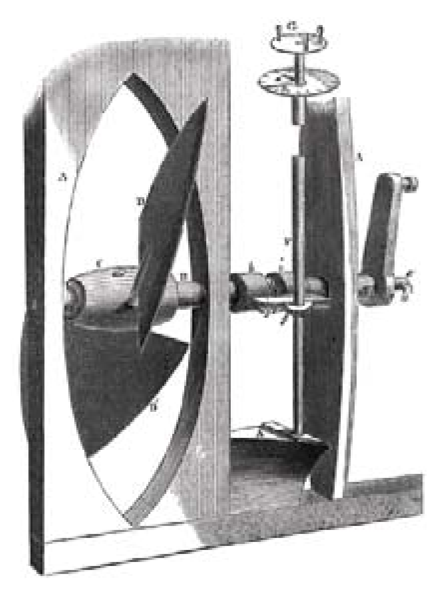
GUANTES DE ORO. «Los boxeadores profesionales suelen proceder de las capas de menores ingresos. Razonaron dos sociólogos que cuando un grupo étnico sustituye a otro en el fondo de la escala social, sus miembros más jóvenes dominan los cuadriláteros. Según recogen las estadísticas, a principios de siglo aproximadamente el 40 por ciento de los boxeadores profesionales eran irlandeses. En los años veinte y treinta tomaron la delantera judíos e italianos. Y hacia 1948 casi la mitad de los boxeadores de todas las categorías eran negros. Según los sociólogos, los muchachos de los barrios bajos, al no disponer de trabajo cualificado, aislados por lo general de la cultura de clase media, se ven tentados por el sueño del 'dinero fácil' y de la consideración pública rápida.»

MODELOS DE PLASMA. «Llenamos de mercurio un pequeño tanque. La oscilación lenta de un agitador, que remueve el mercurio del fondo, no perturba la superficie del líquido. En cambio, al aplicar al tanque un campo magnético intenso el movimiento del fondo se comunica con rapidez a la zona superior. Hemos creado un nuevo tipo de onda, ya predicha teóricamente hace unos 10 años pero generada por primera vez en este experimento. Esa onda resulta del acoplamiento entre las fuerzas magnéticas e hidrodinámicas. ¿Qué tiene que ver con las estrellas? Es posible demostrar que nuestro modelo de mercurio reproduce muchas de las propiedades esenciales de la materia estelar. Se ha supuesto siempre que, en las estrellas, el movimiento de los gases obedece las leyes de la hidrodinámica. Pero si un campo magnético cambia radicalmente las propiedades de los gases estelares densos, como en el modelo de mercurio, esos gases se comportarán de manera muy diferente de los fluidos ordinarios.— Hannes Alfvén» [*Nota de la redacción: Alfvén ganó el premio Nobel de física de 1970 por sus "descubrimientos en magnetohidrodinámica."*]

...cien años

UNA ERUPCIÓN VIOLENTA. «En la tarde del 6 de mayo se interrumpió la comunicación por cable con Martinica, y las noticias siguientes horrorizaron al mundo. Toda una ciudad de 28.000 habitantes había sido literalmente borrada del mapa. Se dice que la cima entera del Mont Pelée estalló lanzando polvo caliente y trozos de roca sobre la ciudad de San Pedro, mientras que por el orificio así creado manaban raudales de barro y lava. Las erupciones volcánicas se atribuyen, por lo general, a la expansión de humedad en el seno de las rocas subterráneas calientes. La teoría original de que la Tierra es una masa líquida cubierta por una fina corteza de materia sólida está ya totalmente descartada por los científicos.»

EL CÓMODO TRASLADO COTIDIANO. «Uno de los últimos ciudadanos destacados que ha testimoniado a favor de la utilidad del automóvil para los hombres de empresa es el señor Henry Clay Frick, el conocido magnate del acero de Pittsburgh. Según cuentan, el millonario calcula que el tiempo que le ahorra el nuevo medio de locomoción equivale al menos a medio millón de dólares anuales. No pasará mucho tiempo antes de que el automóvil compita con el ferrocarril y un rápido viaje a través del fresco y límpido aire mañanero tonifique a quienes han de recorrer cada día, tiznados ahora de carbonilla, cincuenta o cien kilómetros desde su casa en el campo hasta el lugar de trabajo. Sólo faltan unas buenas carreteras para que estas profecías se hagan realidad.»



Hélice de barco de palas orientables, 1852

...ciento cincuenta años

INGENIOSO PROPULSOR. «En el grabado se muestra un perfeccionamiento de los propulsores de hélice donde las palas pueden ajustarse sobre el cubo al objeto de que queden en una posición tal, que no ofrezcan resistencia física al avance del navío con las velas izadas. Además, cuando no gira la hélice, ésta puede actuar de timón y por tanto gobernar la embarcación mientras se navega a vela.»

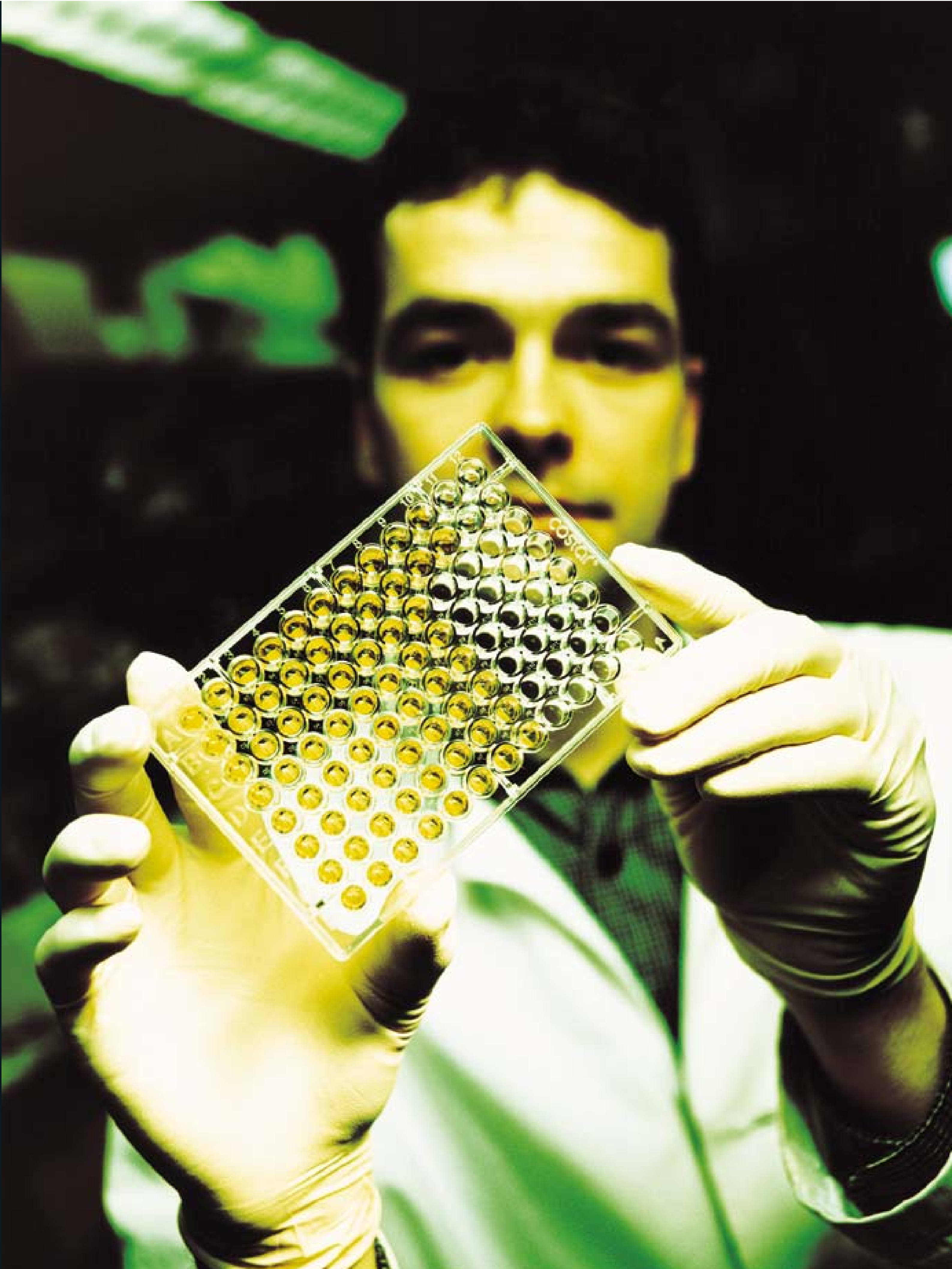
CHINA E IRLANDA. «Ante la Sociedad Literaria de Belfast se ha leído un informe relativo a unos sellos de porcelana chinos. Se han hallado unos cincuenta, varios en ciénagas profundas, uno en una cueva y otros dispersos. Nadie sabe cómo llegaron hasta allá. Su antigüedad es mucha. Presentan inscripciones en el antiguo lenguaje chino de los sellos y el señor [reverendo doctor Karl] Gutzlaff había traducido algunos. Cada sello es un cubo perfecto, con la figura de un mono chino a guisa de mango. Se supone que fueron llevados hasta allá por los antiguos fenicios, aunque nuestra opinión es que fue más bien cosa de alguna de las antiguas tribus irlandesas, que sin duda recorrieron China.»

La lucha contra el carbunco

Las últimas investigaciones sugieren la necesidad de estrategias nuevas que mejoren la prevención y el tratamiento. Encabeza la lista el modo de neutralizar la mortífera toxina de la bacteria del carbunco

John A. T. Young y R. John Collier

1. CULTIVOS DE CELULAS que han sobrevivido a la exposición a la toxina carbuncosa tras ser tratadas con una potente antitoxina. Michael Mourez, de la Universidad de Harvard, sostiene una placa con los cultivos.



La necesidad de nuevos tratamientos frente al carbunco quedó patente el pasado otoño cuando cinco personas murieron tras la inhalación de carbunco, víctimas de la primera diseminación intencionada de esporas bacterianas en los Estados Unidos. Tras pasar unos días con síntomas inespecíficos, los pacientes empeoraron a pesar de recibir un tratamiento intensivo con antibióticos. Otras seis personas enfermaron también gravemente antes de lograr recuperarse.

Por suerte, nuestros laboratorios y también otros comenzaron a estudiar el agente etiológico, el *Bacillus anthracis*, y a buscar antídotos mucho antes del otoño de 2001. Recientes descubrimientos han llevado a la elaboración de nuevos medicamentos y de vacunas más eficaces. Es más, sólo en el pasado año, nosotros dos y nuestros colaboradores hemos dado a conocer tres prometedores prototipos de fármacos.

Un asesino esquivo

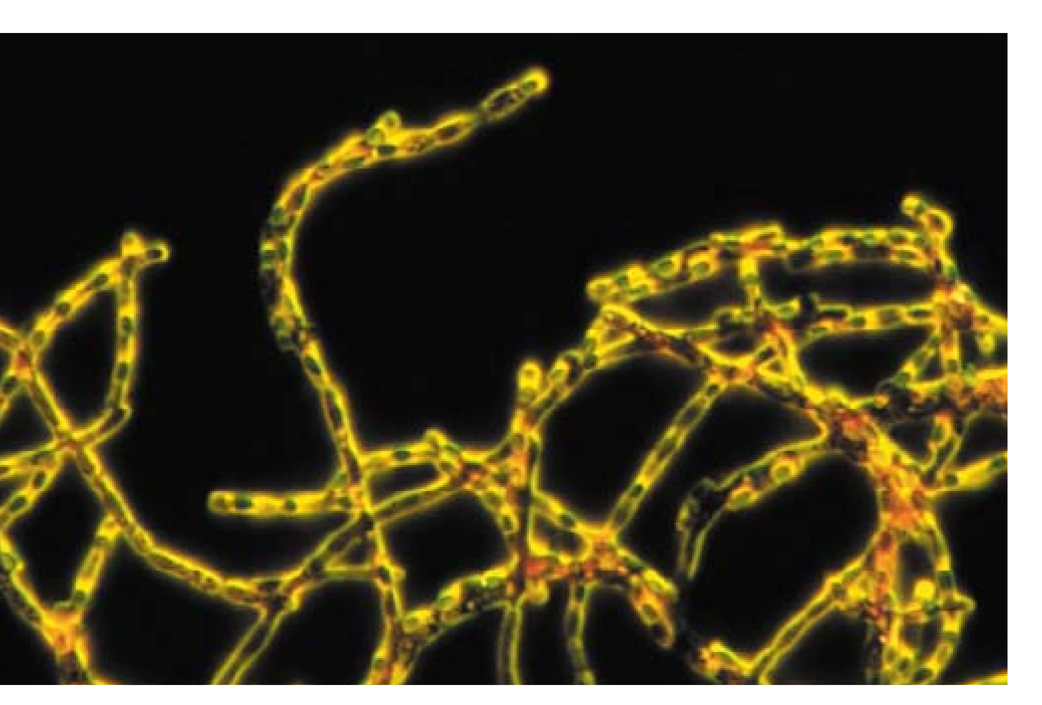
Los nuevos planteamientos en la lucha contra el carbunco surgieron de las investigaciones sobre la patogénesis inducida por *B. anthracis*. El carbunco no se transmite de persona a persona. El hombre (o el animal) enferma sólo cuando una gran cantidad de esporas penetra en su cuerpo a través de una herida o mediante alimentos contaminados, o por esporas esparcidas por el aire. En el interior del cuerpo las esporas se transforman en células "vegetativas", que acometen un proceso de multiplicación activa.

Las bacterias carbuncosas que invaden la piel o el tracto digestivo producen una alteración local que puede quedar autolimitada: úlceras negras e inflamación en primer lugar; vómitos, dolor abdominal y hemorragia quizás a continuación. Si el crecimiento bacteriano persiste en la piel o en el tracto digestivo sin ser detectado, los microorganismos pueden terminar por alcanzar el torrente sanguíneo y desencadenar una enfermedad sistémica.

Las esporas que se inhalan e invaden profundamente los pulmones suelen permanecer allí poco tiempo; adquieren la forma vegetativa y se trasladan con rapidez a los nódulos linfáticos situados en mitad del tórax, desde donde muchas células acceden a la sangre. Mientras tanto, las bacterias que continúan en los pulmones provocan un edema que dificulta la respiración.

La masiva multiplicación de la bacteria carbuncosa en la sangre conduce, por regla general, a la muerte del enfermo. *B. anthracis* debe su éxito difusor a la secreción de dos factores virulentos que pueden hacer fracasar por completo las defensas inmunitarias, destinadas a frenar el crecimiento bacteriano. Uno de estos factores envuelve las células vegetativas en una cápsula polimérica que inhibe su ingestión por los macrófagos y los neutrófilos del sistema inmunitario, las células carroñeras que habitualmente degradan las bacterias patógenas. El segundo es una toxina extraordinaria que realiza su acción en estas células carroñeras o fagocitos e impide que cumplan su misión aniquiladora de bacterias.

Se supone que la toxina carbuncosa, que también penetra en otras células, contribuye a esta mortal enfermedad no sólo debilitando la respuesta inmunitaria, sino también mediante una acción directa. Apoya esta idea la observación de que la toxina sola, sin presencia de bacterias, puede matar animales. Por el contrario, si se promueve que el sistema inmunitario neutralice la toxina, podemos evitar que el *B. anthracis* cause la enfermedad.



2. CELULAS DE LA BACTERIA carbuncosa en proceso de división activa que se colocan en cadenas a modo de furgones enlazados.

Una toxina letal

Harry Smith y su grupo, del Centro de Investigaciones Microbiológicas de Wiltshire, descubrieron la toxina en los años cincuenta. Comprobado su papel central en la letalidad del carbunco, muchos investigadores se propusieron descubrir el mecanismo en cuya virtud esta sustancia "intoxicaba" las células, es decir, su penetración y actuación consiguiente. Ambos aspectos ofrecen claves esenciales para bloquear sus efectos. Stephen H. Leppla y Arthur M. Friedlander, durante su estancia en el norteamericano Instituto Médico Militar de Investigación de las Enfermedades Infecciosas, se centraron en estos problemas en los años ochenta; no-

La detección del carbunco

La detección rápida puede salvar vidas,
por Rocco Casagrande

Si un grupo terrorista disemina esporas carbuncosas por el aire, pueden resultar afectadas muchas personas, aunque probablemente no se note hasta la hospitalización de las víctimas. Algunas no llegarán a tiempo de salvarse con el tratamiento clásico. No obstante, la enfermedad se podría prevenir en buena medida si las futuras defensas contra los ataques de carbunco incluyeran sensores que hicieran saltar la alarma en cuanto aparecieran esporas en el medio. No se han desarrollado todavía los instrumentos necesarios, pero se han diseñado varios prototipos que incorporan adelantos técnicos de interés.

Los sensores ambientales deben distinguir entre los agentes causantes de enfermedad (patógenos) y los miles de microorganismos inofensivos que pululan por el aire, agua y suelo. La investigación se orienta hacia la detección de moléculas específicas situadas en la superficie de los patógenos o de secuencias de ADN que sólo poseen estos organismos.

En el Canario, desarrollado en el Laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts, tenemos un ejemplo innovador de instrumentos que detectan organismos patógenos, basados en moléculas específicas de superficie. Los sensores del Canario consisten en células vivas (células B del sistema inmunitario) que han sufrido una modificación genética para que emitan una luz cuando cambien sus niveles de calcio. Sobresaliendo de estas células hay unos receptores que se unen sólo a una zona concreta de una molécula de superficie de un patógeno particular. Cuando las células del sensor se unen a su objetivo, se liberan iones de calcio de sus depósitos celulares, con la emisión consiguiente de luz. El Canario puede diferenciar entre distintos patógenos haciendo pasar una muestra por varios módulos llenos de células, ya que cada uno de los ellos reacciona frente a un microorganismo determinado.

El sistema GeneXpert, desarrollado por Cepheid en la californiana Sunnyvale, es un ejemplo de planteamiento genético del problema. Comienza su trabajo extrayendo el ADN de los microorganismos de una muestra. A continuación, si está presente alguno de los patógenos en cuestión, se unen pequeños cebadores [segmentos de material genético que reconocen secuencias específicas cortas de ADN] a las terminaciones de los fragmentos del ADN exclusivo del patógeno. El paso siguiente consiste en realizar la reacción en cadena de la polimerasa (RCP), en la que el sistema produce muchas copias del ADN así delimitado, añadiendo etiquetas fluorescentes a las nuevas copias a lo largo del proceso. A los treinta minutos, el GeneXpert obtiene ADN en cuantía suficiente para detectar incluso una pequeña cantidad de un organismo preocupante que se encuentre en la muestra original.

Este sistema consta de múltiples cámaras de reacción RCP con diferentes colecciones de cebadores que permiten detectar simultáneamente gérmenes patógenos distintos. Además, el sistema GeneXpert podría utilizarse para comprobar si se encuentra presente la bacteria carbuncosa en un exudado nasal, extraído de un paciente, en tan sólo media hora, un método mucho más rápido que las técnicas microbiológicas tradicionales.





CARTUCHO utilizado en el sistema experimental GeneXpert. Mide aproximadamente el tamaño del pulgar de un adulto (*izquierda*). En su interior, las ondas sonoras bombardean material de investigación, disgregan células y provocan la salida de su ADN. Si se encuentra presente algún microorganismo patógeno de interés, se ampliará su ADN en el tubo de reacción en forma de flecha (*saliente*); los bordes de la punta de flecha se iluminarán con una luz fluorescente. La micrografía (*derecha*) muestra los restos de una célula que ha regurgitado su contenido.

Los instrumentos diseñados específicamente para detectar las esporas de la bacteria carbuncosa o de microorganismos afines (el agente del botulismo) pueden aprovechar un dato valioso: tales esporas se encuentran envueltas en ácido dipicolínico (ADP), una sustancia que difícilmente se halla en la naturaleza y que les ayuda a subsistir en condiciones ambientales adversas. Se han obtenido resultados esperanzadores con moléculas fluorescentes que se unen al ADP y se convierten en detectores químicos del carbunco. Los “olfateadores electrónicos” —citaremos el sistema de detección Cyranose fabricado por Cyrano Sciences de Pasadena— podrían “oler” la presencia de ácido dipicolínico en una muestra de aire rociado con esporas carbuncosas.

El peligro real de una diseminación de carbunco reside en su carácter secreto. Si un ataque se descubre pronto y si los individuos expuestos reciben tratamiento con rapidez, las víctimas tienen muchas posibilidades de sobrevivir. Para lograr una detección precoz, los sensores basados en los sistemas descritos o en técnicas de nuevo cuño podrían eliminar esa arma terrible de un arsenal terrorista.

ROCCO CASAGRANDE es un investigador de Surface Logix, de Brighton, Massachusetts, en donde ha desarrollado métodos e instrumentos para detectar armas biológicas.

sotros dos y otros nos incorporamos a la tarea algo más tarde.

La toxina consta de tres proteínas: un antígeno protector, el factor edematoso y el factor letal. Estas proteínas cooperan, si bien no se hallan siempre en conexión física. Consideradas una por una son inocuas, hasta que atacan y entran en las células, proceso que ejecutan siguiendo un patrón orquestado.

El factor edematoso y el factor letal catalizan reacciones moleculares diferentes en las células. El factor edematoso atenta contra los mecanismos de control del flujo de iones y agua a través de las mem-

EL ANTRAX EN ACCION

Los médicos clasifican el carbunco según los tejidos inicialmente infectados. La enfermedad se torna letal cuando el agente bacteriano, *Bacillus anthracis*, alcanza el torrente circulatorio y se multiplica en él, produciendo grandes cantidades de una peligrosa toxina. La investigación se ha centrado en la neutralización de la toxina.

TRES CLASES

CARBUNCO POR INHALACION
Las esporas se inhalan

CARBUNCO GASTROINTESTINAL
Las esporas se ingieren al comer carne contaminada

CARBUNCO CUTANEO
Las esporas penetran en la piel a través de una herida

PATOGENESIS DEL CARBUNCO POR INHALACION

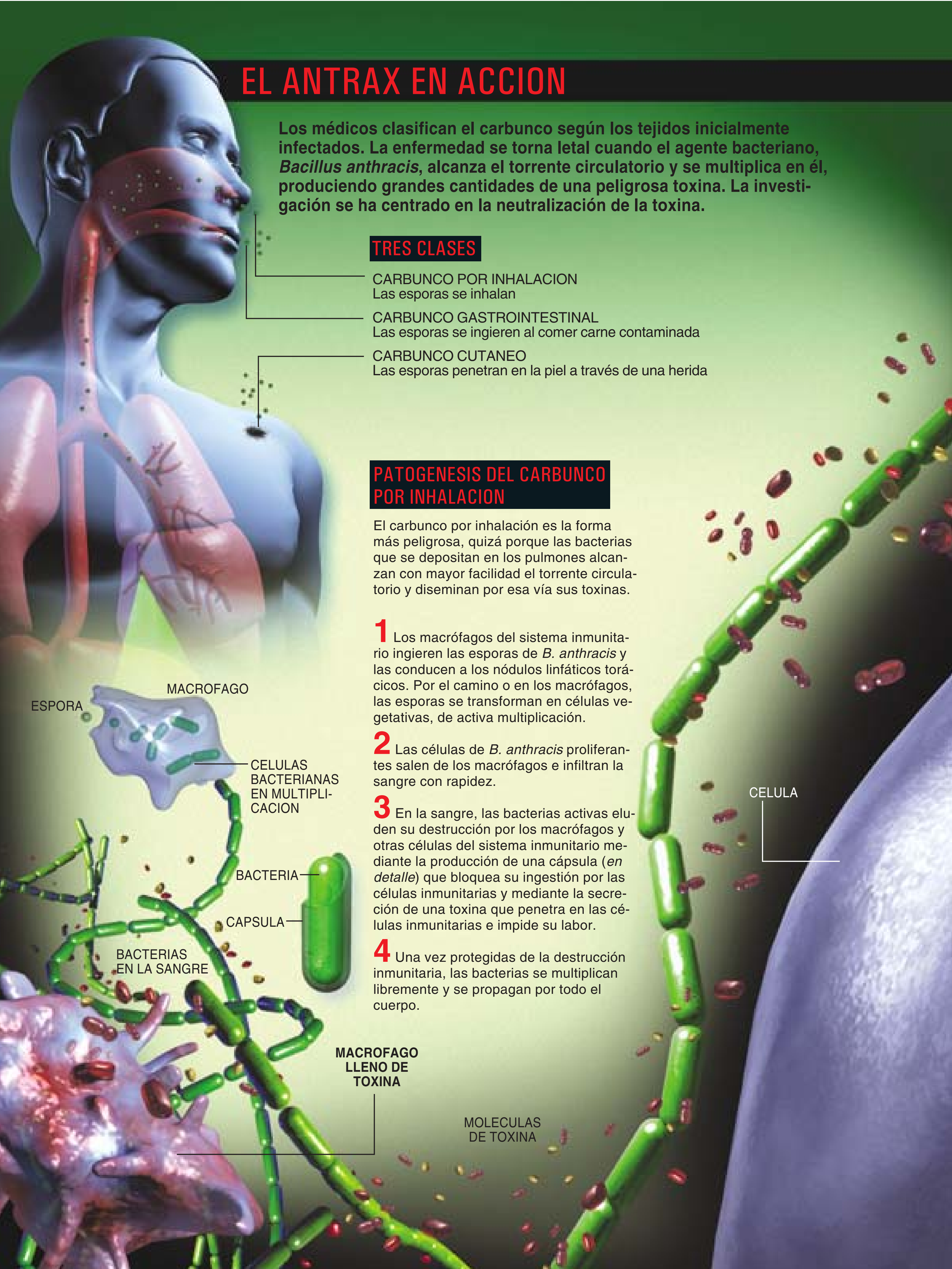
El carbunco por inhalación es la forma más peligrosa, quizá porque las bacterias que se depositan en los pulmones alcanzan con mayor facilidad el torrente circulatorio y diseminan por esa vía sus toxinas.

1 Los macrófagos del sistema inmunitario ingieren las esporas de *B. anthracis* y las conducen a los nódulos linfáticos torácicos. Por el camino o en los macrófagos, las esporas se transforman en células vegetativas, de activa multiplicación.

2 Las células de *B. anthracis* proliferantes salen de los macrófagos e infiltran la sangre con rapidez.

3 En la sangre, las bacterias activas eluden su destrucción por los macrófagos y otras células del sistema inmunitario mediante la producción de una cápsula (*en detalle*) que bloquea su ingestión por las células inmunitarias y mediante la secreción de una toxina que penetra en las células inmunitarias e impide su labor.

4 Una vez protegidas de la destrucción inmunitaria, las bacterias se multiplican libremente y se propagan por todo el cuerpo.



MECANISMO DE INVASION CELULAR. MODO DE IMPEDIRLA

LA TOXINA CARBUNCOSA ha de entrar en las células para dañar al organismo. Está formada por tres proteínas que colaboran entre sí: el antígeno protector (AP), el factor edematógeno (FE) y el factor letal (FL). Los dos últimos alteran los mecanismos celulares, pero sólo después de que el antígeno protector los haya conducido hasta el citosol, la matriz que rodea los compartimentos intracelulares. Gracias a la comprensión del mecanismo molecular que permite a los factores alcanzar el citosol se han elaborado propuestas para bloquear este trayecto y así neutralizar la toxina y salvar vidas. En estudios de laboratorio han dado resultados esperanzadores las antitoxinas que se describen en los recuadros.

PROYECTO TERAPEUTICO

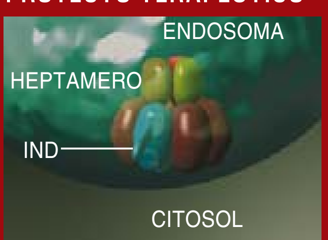


Impedir que el FE y el FL alcancen sus lugares de unión en los heptámeros de AP. Taponar esos lugares con copias ligadas de una molécula que también tenga afinidad por dichos sitios.

PROYECTO TERAPEUTICO

Evitar que el AP se una a sus receptores de la célula. Obligarle a que se una a señuelos tales como copias solubles del lugar de unión del receptor del AP de la toxina.

PROYECTO TERAPEUTICO



Bloquear el transporte del FE y el FL por el endosoma al interior del citosol mediante la producción de nuevos heptámeros que incorporen una versión del AP conocida como inhibidor negativo dominante (IND). El IND contiene heptámeros que no pueden llevar el FE y el FL a través de la membrana del endosoma.

Los autores

JOHN A. T. YOUNG y R. JOHN COLLIER han colaborado durante varios años en la investigación de la toxina carbuncosa. Young ocupa la cátedra Howard M. Temin en el laboratorio McArdle de investigaciones oncológicas adscrito a la Universidad de Wisconsin en Madison. Collier enseña microbiología y genética molecular en la facultad de medicina de la Universidad de Harvard.

branas celulares; produce, en consecuencia, un edema en los tejidos. En los fagocitos consume una energía preciosa que podría haberse empleado para englobar a las bacterias.

Se conoce menos el proceder exacto del factor letal, que parece desempeñar un papel principal en la muerte de los enfermos. Sabemos que se trata de una proteasa que segmenta las enzimas de la familia MAPKK. Ahora hay que descubrir qué ocurre en el nivel molecular tras esta lisis y poner de manifiesto la intervención de este factor en la enfermedad y en la muerte.

Tácticas terapéuticas

Algunos fármacos capaces de neutralizar la toxina carbuncosa facilitarían el quehacer del sistema inmunitario en su lucha contra la multiplicación bacteriana y quizá redujeran el riesgo de muerte. En este momento, los antibióticos administrados a las víctimas que inhalaron carbunco pueden controlar la diseminación bacteriana, pero no impiden que la toxina realice su acción destructora.

En principio, la actividad de la toxina podría detenerse si se lograra atajar alguna de las etapas del proceso de intoxicación. Cabría proponerse bloquear el proceso secuencial en una fase precoz, impidiendo que el antígeno protector atacara a las células. Hará unos diez años se comprobó que esta proteína iniciaba la entrada de la toxina enlazándose con alguna proteína de la superficie celular; cuando se trataba a las células con enzimas que eliminaban todas sus proteínas de superficie, el antígeno protector no encontraba punto de anclaje. Pero hasta hace muy poco no se sabía cuál de las innumerables proteínas celulares servía de receptor crucial.

Nosotros, junto con nuestros colaboradores Kenneth Bradley, Jeremy Mogridge y Michael Mourez, encontramos el pasado verano el receptor en cuestión. Tras un análisis detallado de la molécula receptora de la toxina del carbunco (RTC, o ATR en siglas de su expresión inglesa) reveló que atraviesa la membrana celular y forma un saliente. Esta parte emergente contiene una zona similar a la región que en otros receptores sirve de punto de anclaje de ciertas proteínas. Nuestro hallazgo sugería que el dominio de marras era el lugar en donde el antígeno protector se situaba sobre el RTC. Así es.

Con todo, seguimos ignorando la función normal que desempeña el receptor; a buen seguro la célula no lo adquirió en su curso evolutivo para facilitarle la entrada a la toxina carbuncosa. Pero el conocer la constitución de la molécula nos ha permitido someter a prueba inhibidores de su actividad. Hemos tenido éxito, por ejemplo, con una forma soluble del dominio receptor que se une al antígeno protector (“sATR”). Cuando las moléculas de este compuesto se mezclan en el interior del medio que rodea a las células, actúan como señuelos eficaces: el antígeno protector se une a ellos en vez de asirse a los verdaderos receptores celulares.

Ahora intentamos producir dicho compuesto soluble en la cantidad necesaria para evaluar su capacidad anticarbuncosa en roedores y primates no humanos, experimentos que deben realizarse antes de aplicar cualquier fármaco nuevo al hombre. Otros grupos estudian si ciertos anticuerpos artificiales (moléculas muy específicas del sistema inmunitario) pueden establecer una trabazón vigorosa con el antígeno protector para evitar que se acople a su receptor.

Más objetivos

Se buscan medios para interrumpir otros pasos más avanzados del proceso de intoxicación. A este respecto, un equipo de Harvard ha ideado un fármaco bloqueante de las zonas del heptámero que prenden a los factores edematógeno y letal. El grupo, procedente de los laboratorios de Collier y George M. Whitesides, pensó que un heptámero taponado no lograría transportar los factores hasta el interior de las células.

Comenzamos por rastrear péptidos aleatoriamente construidos para comprobar si había alguno que se uniera al heptámero. Observamos que una de estas cadenas cortas de aminoácidos sí lo hacía. ¿Tenía capacidad para bloquear la actividad de la toxina? Sólo muy débilmente. Dimos por bueno que sería más eficaz taponar muchos dominios de unión del heptámero con los factores edematógeno y letal. Aprovechamos los procedimientos químicos desarrollados por el grupo de Whitesides y unimos una media de 22 copias del péptido a un polímero flexible. Esta estructura demostró ser un poderoso inhibidor de la acción de la toxina (siete mil veces mejor que el péptido libre), lo mismo en cultivos celulares que en ratas.

Resumen/Carbunco

- Una toxina trimérica producida por *Bacillus anthracis* es la responsable principal de los síntomas y la letalidad del carbunco.
- Para provocar su acción lesiva la toxina debe penetrar en el interior del citosol celular, la sustancia que baña los compartimentos internos de las células.
- Los fármacos que impidan que la toxina alcance el citosol serán los que logren limitar la enfermedad y salvar la vida de las personas infectadas con la bacteria carbuncosa.
- Las investigaciones sobre el modo en que la toxina entra en las células han llevado a descubrir algunas posibles antitoxinas.

Enseñanzas clínicas

En la actualidad, los médicos tienen una visión diferente de la inhalación del carbunco,
por Ricki L. Rusting



NORMA WALLACE de Willingboro, Nueva Jersey, es uno de los seis pacientes que sobrevivieron a la inhalación de carbunco el pasado otoño.

Los recientes casos de inhalación de carbunco en los Estados Unidos han acabado con viejas creencias acerca de la enfermedad. Cuando en septiembre de 2001 comenzaron a aparecer cartas contaminadas, las autoridades sanitarias pensaron en un principio que sólo correrían peligro las personas que las abrieran y quizá quienes estuvieran a su alrededor. Pero las esporas salieron a través de los sobres y contaminaron las instalaciones postales. Esta "contaminación cruzada" explica las muertes de dos de las once personas en las que se confirmó el carbunco por inhalación el año pasado. Frente a lo esperado, las esporas no permanecían inmóviles una vez posadas. Retornan al aire cuando la gente camina por una habitación infectada.

Hubo una sorpresa positiva. Antes de octubre de 2001, creíase que el carbunco por inhalación era casi siempre incurable cuando los síntomas habían aparecido. Pero los médicos acabaron con ese temor cuando salvaron a seis de esas víctimas. ¿Por qué unas sí y otras no? Los investigadores no acertaron con una razón definitiva, habida cuenta del número de casos, pero aparecieron algunas similitudes interesantes cuando John A. Jernigan, del Centro de Control y Prevención de la Enfermedad (CDC), y un grupo de expertos revisaron las historias clínicas de los diez primeros pacientes. Sus resultados aparecieron en el número de noviembre-diciembre de *Emerging and Infectious Diseases* y en Internet.

Los investigadores publicaron que un diagnóstico precoz puede ser beneficioso. El carbunco por inhalación tiene dos fases sintomáticas: un primer período caracterizado, como en otras enfermedades comunes, por síntomas diversos (cansancio, fiebre, dolores y tos) y una fase posterior en la que los pacientes caen gravemente enfermos con fiebre alta, respiración dificultosa y shock. A seis de los diez pacientes se les administraron antibióticos activos frente a la bacteria carbuncosa, el *Bacillus anthracis*, cuando mostraban los primeros síntomas de la infección; sólo ellos sobrevivieron.

La clase de antibióticos recetados y la utilización de combinaciones de fármacos pueden asimismo haber facilitado esa proporción inesperada de supervivencia. Nueve de las personas que se estudiaron en la revisión fueron tratadas antes de que el CDC publicara lo que llamó "guía provisional" para el tratamiento del carbunco por inhalación el 26 de octubre, pero la mayoría de los pacientes recibieron una medicación parecida a la de la guía: ciprofloxacina o doxiciclina junto con uno o dos fármacos que inhiben la multiplicación del *B. anthracis* (rifampicina, vancomicina, penicilina, ampicilina, cloranfenicol, imipenem, clindamicina y claritromicina). Podría también resultar útil un tratamiento de "sostén" agresivo que incluyera el drenaje de los peligrosos exudados pulmonares.

Los supervivientes, sin embargo, seguían muy enfermos y Jernigan añadió que deberían continuar en observación por si surgían complicaciones, pero a mediados de enero no había ninguna señal de que las hubiera. Los investigadores sospechan que las antitoxinas carbuncosas podrían facilitar la evolución de muchas personas afectadas por el carbunco, así como rescatar enfermos que no se salvarían con los tratamientos habituales.

Otro agente interesante, quizás el más próximo al ensayo en humanos, modifica al propio heptámero. Este compuesto fue descubierto después de que Bret R. Sellman, del grupo de Collier, viera que, cuando algunas formas mutantes del antígeno protector se mezclaban con formas normales, los heptámeros se erigían en las células como de costumbre, pero no podían inyectar los factores edematógeno y letal en el interior del citosol. Además, algunos de estos mutantes resultan tan disgregadores, que basta una sola copia en un heptámero para evitar la inoculación.

En un estudio dado a conocer en abril de 2001 los mutantes en cuestión, denominados inhibidores negativos dominantes (IND), demostraron ser unos bloqueadores potentes de la toxina carbuncosa, lo mismo en cultivos celulares que en ratas. Con una dosis reducida de IND seleccionado se neutralizaba una cantidad de antígeno protector y de factor letal que, sin ello, hubiera matado a una rata en noventa minutos. Estos descubrimientos sugieren que cada copia mutante de antígeno protector inactiva seis copias normales en el torrente circulatorio y que, a buen seguro, está capacitada para reducir de un modo drástico la actividad de la toxina en los enfermos.

Conforme se vayan despejando más incógnitas sobre la toxina, aparecerán nuevas terapias posibles. Conocido ya el receptor del antígeno protector, puede utilizarse como un objetivo en las pruebas llevadas a cabo para encontrar fármacos que impidan la unión. El desentrañamiento de la estructura tridimensional del receptor revelará los puntos de contacto exactos entre el antígeno protector y el receptor y permitirá elaborar fármacos que bloqueen el receptor.

Habrá que sacar a la luz las interacciones moleculares en cuya virtud los heptámeros del antígeno protector transitan de la superficie celular a los endosomas del interior. Sería muy útil impedir ese traslado. ¿Y qué ocurre después de que el factor letal lise las enzimas MAPKK? ¿De qué modo esos acontecimientos afectan a las células? Aunque esta última pregunta permanece en el alero, la investigación reciente sobre el factor letal nos da esperanzas de hallar fármacos capaces de inactivarlo. En noviembre de 2001, Robert C. Liddington, del Instituto Burnham de

La Jolla, y sus colaboradores de varios laboratorios publicaron la estructura tridimensional de la parte del factor letal que actúa sobre las moléculas de MAPKK. Ese centro puede ahora convertirse en un objetivo para el control de fármacos o su fabricación.

Tras la secuenciación del código genético de *B. anthracis* se abren nuevas pistas para la investigación farmacológica. El descubrimiento de genes semejantes a otros que regulan funciones conocidas en organismos distintos aportará información adicional sobre el modo en que la bacteria carbuncosa produce la enfermedad y cómo atajarla. De la investigación persistente saldrán nuevas antitoxinas. Para conseguir una mayor eficacia, probablemente se administrarán estos fármacos con antibióticos, al igual que se recomiendan cócteles de fármacos antivíricos en el tratamiento de la infección por VIH.

Terapias preventivas prometedoras

A la par que se trabaja para mejorar los procedimientos terapéuticos, se investigan posibles vacunas. Las que actúan contra bacterias productoras de toxina preparan al sistema inmunitario para que neutralice la toxina en cuanto aparezca en el organismo y así prevenir la enfermedad. Ganado procedente de diferentes regiones de los Estados Unidos ha recibido preparaciones de células de *B. anthracis* que carecían de la cápsula protectora, por lo que apenas se replicaban. Una vacuna humana similar se ha utilizado en la antigua Unión Soviética. Sin embargo, las preparaciones que contienen microorganismos completos causan a menudo efectos secundarios y preocupa la posibilidad de que estas células lleguen a producir la enfermedad que se quería prevenir.

La única vacuna anticarbuncosa aprobada en los Estados Unidos para su aplicación en humanos procede de forma diferente. Consiste en moléculas de toxina sometidas a un tratamiento químico para impedir que causen la enfermedad en el hombre. Se produce mediante crecimiento de la cepa atenuada de *B. anthracis* en un cultivo, filtrado de las células bacterianas del medio de cultivo, adsorción de las proteínas de la toxina del filtrado resultante por un coadyuvante (una sustancia que aumenta la respuesta inmunitaria) y tratamiento de la mezcla con formaldehído para inactivar las proteínas. La inoculación de esta vacuna anticarbuncosa adsorbida (VAA), así se llama el preparado, estimula la producción de anticuerpos por parte del sistema inmunitario, los cuales se unen específicamente e inactivan a los componentes de la toxina. La mayoría de los anticuerpos, sin embargo, actúan sobre el antígeno protector, lo que explica el nombre de la proteína: es el componente que mejor obtiene su inmunidad protectora.

La VAA se ha administrado a soldados y a algunos civiles, aunque resulta complicado extenderla a toda la población en caso de guerra biológica. Sus existencias son limitadas, pero aun cuando se dispusiera de la misma en abundancia, sería engorroso administrarla a gran escala, ya que el protocolo habitual requiere seis inyecciones a lo largo de 18 meses, seguidas de dosis de recuerdo anuales. No se permite la utilización de la vacuna en personas ya expuestas a las esporas de carbunco. En el pasado año las autoridades, preocupadas por si las esporas pudieran sobrevivir en los pulmones mucho tiempo, comenzaron a ofrecer una vacuna abreviada, en series de tres dosis, a carteros y otras personas que hubieran tomado ya durante sesenta días antibióticos como medida preventiva. Las personas que aceptaban este tratamiento se comprometían a tomar antibióticos otros cuarenta días más, tras los cuales la inmunidad, estimulada por la vacuna, probablemente sería suficiente para ofrecer una protección adecuada.

Con la esperanza de obtener una vacuna más potente, con menos efectos secundarios y más rápida, muchos investigadores se han centrado en desarrollar vacunas compuestas sobre todo de antígeno protector fabricado mediante técnicas de recombinación de ADN. A través de la unión de proteína recombinante con un potente coadyuvante de nueva generación, se puede generar con relativa rapidez una inmunidad protectora con tan sólo una o dos inyecciones. Los inhibidores negativos dominantes antes nombrados como posibles tratamientos pueden escogerse como formas útiles de antígeno protector. Estas moléculas conservan su capacidad para suscitar respuestas inmunitarias. Por lo tanto, podrían realizar un óptimo servicio: desorganizar la toxina carbuncosa a corto plazo, mientras construyen la inmunidad que persistirá posteriormente.

No dudamos de que la creciente investigación sobre la biología de *B. anthracis* y sus posibles tratamientos y vacunas nos recompensará con toda una gama de terapias eficaces contra el carbunco. Esperamos fervientemente que esos esfuerzos signifiquen que nadie morirá a causa de un carbunco adquirido de forma natural ni, por supuesto, como resultado del terrorismo biológico.

Bibliografía complementaria

ANTHRAX AS A BIOLOGICAL WEAPON: MEDICAL AND PUBLIC HEALTH MANAGEMENT. Thomas V. Inglesby et al. en *Journal of the American Medical Association*, vol. 281, n.º 18, págs. 1735-1745; 12 de mayo, 1999.

DOMINANT-NEGATIVE MUTANTS OF A TOXIN SUBUNIT: AN APPROACH TO THERAPY OF ANTHRAX. Bret R. Sellman, Michael Mourez y R. John Collier en *Science*, vol. 292, págs. 695-697; 27 de abril, 2001.

DESIGNING A POLYVALENT INHIBITOR OF ANTHRAX TOXIN. Michael Mourez et al. en *Nature Biotechnology*, vol. 19, págs. 958-961; octubre, 2001.

IDENTIFICATION OF THE CELLULAR RECEPTOR FOR ANTHRAX TOXIN. Kenneth A. Bradley, Jeremy Mogridge, Michael Mourez, R. John Collier y John A. Young en *Nature*, vol. 414, págs. 225-229; 8 de noviembre, 2001.



Impactos repetidos

¿Sufrió nuestro planeta impactos extraterrestres capaces de producir extinciones en masa no una, sino dos o incluso varias veces?

Luann Becker

Pocos caen en la cuenta, pero la Tierra está sometida a un constante bombardeo desde el cosmos. Nuestra vecindad galáctica está llena de cometas, asteroides y otros residuos del nacimiento del sistema solar. La mayor parte de los detritus espaciales que inciden sobre la Tierra consisten en polvo interplanetario, pero los ha habido de cinco o más kilómetros de diámetro. Basándose en el número de cráteres de la Luna, se calcula que unas 60 de esas gigantescas rocas espaciales se estrellaron contra la Tierra en los últimos 600 millones de años. Incluso el menor de esos choques habría dejado una cicatriz de 95 kilómetros de anchura y provocado una explosión que liberó una energía cinética equivalente a la detonación de diez billones de toneladas de trinitrotolueno.

Impactos de tamaña magnitud pueden, sin duda, desencadenar enormes y bruscos cambios en el planeta y en sus habitantes. A lo largo del mismo período, el registro fósil revela cinco grandes crisis biológicas en las cuales, en promedio, dejaron de existir más de la mitad de las especies vivientes. Tras un período de acalorada controversia, se fue aceptando que una de esas catástrofes, la desaparición de los dinosaurios hace 65 millones de años, se debió al impacto de un asteroide. Con esa única excepción, sin embargo, las pruebas convincentes de que grandes impactos hubiesen coincidido con extinciones en masa continuaron siendo esquivas hasta hace poco.

Durante los dos últimos años se han descubierto métodos que permiten enjuiciar dónde y cuándo se produjeron impactos; las pruebas que los relacionan con otras desapariciones generalizadas son cada vez más sólidas. Están apareciendo nuevos trazadores de impactos, por ejemplo, en rocas depositadas al final del período Pérmico, la época, hace 250 millones de años, en que un misterioso suceso, la Gran Extinción de la Era Primaria, aniquiló el 90 por ciento de las especies del planeta. Los indicios de impactos asociados a otras extinciones son más débiles, pero también se están reforzando.

Las señales de que ha habido diversos impactos que alteraron la vida en la Tierra adoptan formas variadas. Los cráteres y las rocas fracturadas o con huellas de choque —las mejores señales de un antiguo impacto— aparecen en intervalos clave de tiempo que indican una relación con las extinciones. Pero con más frecuencia, los indicios físicos de ese tipo están enterrados bajo espesas capas de sedimentos o enmascarados por la erosión. Ahora se sabe que las grandes catástrofes también dejan otras huellas directas, además de indirectas, escondidas en el archivo de las rocas. Entre los primeros trazadores directos se contaron los diminutos cristales minerales que los choques fracturaron o fundieron. En los estratos depositados se han encontrado también elementos que se sabe se forman en el espacio pero no en la Tierra. Mis colaboradores y yo hemos detectado, en varios sedimentos y cráteres que se sospecha están relacionados con impactos, gases extraterrestres aprisionados en el interior de fullerenos, un tipo de molécula de carbono.

No es menor el interés de los trazadores indirectos que han encontrado los paleontólogos: al menos tres de las cinco grandes extinciones coinciden con rápidas desapariciones de la



vegetación terrestre y bruscas disminuciones en la productividad de los organismos marinos. Perturbaciones tan violentas y veloces en el ecosistema terrestre son raras; algunos sospechan que sólo un cataclismo, de la índole de un gran impacto, pudo desencadenarlas.

Asesino de dinosaurios

El primer trazador de impacto ligado a una extinción catastrófica en masa fue una concentración de iridio impropia de la Tierra; este elemento, aunque abundante en muchos meteoritos, es raro en las rocas de nuestro planeta. En 1980, un grupo de la Universidad de California en Berkeley —encabezado por el premio Nobel de física Luis Alvarez y su hijo, el geólogo Walter Alvarez— comunicó una concentración sorprendentemente elevada en una capa de arcilla de un centímetro de espesor, al descubierto cerca de Gubbio, en Italia. El grupo de Berkeley calculó que la cantidad media depositada cada día de polvo cósmico no podía explicar la de iridio que habían medido. Basándose en estos descubrimientos, los científicos lanzaron la hipótesis de que se trataba de lo depositado tras la explosión que se produjo cuando chocó con la Tierra un asteroide de 10 a 14 kilómetros de diámetro.

Todavía más fascinante era que la capa de arcilla se hubiese datado en 65 millones de años, el final del Cretácico. De este descubrimiento del iridio surgió la hipótesis, que marcaría un hito histórico, según la cual un impacto gigante terminó con el reinado de los dinosaurios; y tras ella vendría su extensión natural: que sucesos de esa especie podrían haber estado asociados a otras graves extinciones en masa a lo largo de los últimos 600 millones de años. Dos decenios atrás, esta atrevida hipótesis que tanto abarcaba conmocionó a los científicos, quienes en su mayoría se habían conformado con suponer que la extinción de los dinosaurios fue un proceso gradual iniciado por el aumento contemporáneo de la actividad volcánica mundial. El anuncio condujo a intensos debates y a que se reexaminasen las rocas de finales del Cretácico en todo el mundo.

Este escrutinio descubrió tres trazadores adicionales de impactos: las violentas deformaciones de las rocas terrestres y la vida vegetal creadoras de microesférulas, el cuarzo con huellas de choque y las concentraciones elevadas de hollín. En 1981, Jan Smit, hoy en la Universidad Libre de Amsterdam, descubrió gotículas microscópicas de vidrio, o microesférulas, que, sostuvo, fueron una consecuencia del rápido enfriamiento de la roca fundida que había saltado a la atmósfera durante el impacto. Tres años más tarde, Bruce Bohor y sus colaboradores del Servicio de Inspección Geológica de los EE.UU. explicaban la formación de cuarzo con huellas de choque. Pocas circunstancias terrestres tienen el poder de deformar el cuarzo, mineral muy estable incluso a las presiones y temperaturas que soporta en las honduras de la corteza terrestre.

En los días en que las microesférulas y el cuarzo con huellas de choque empezaron a contar como trazadores de impacto, algunos todavía atribuían la existencia de aquéllas y éste a una actividad volcánica extrema. Las erupciones potentes pueden fracturar los granos de cuarzo, pero sólo en una dirección, no en las múltiples que aparecían en los ejemplares de Bohor. Las microesférulas contenían, en cantidades de traza, elementos a todas luces diferentes de los que se forman en las erupciones volcánicas. Después se hallaron niveles excesivos de iridio en más de cien yacimientos de fines del Cretácico repartidos por todo el mundo y cuarzo con huellas de choque en más de treinta puntos.

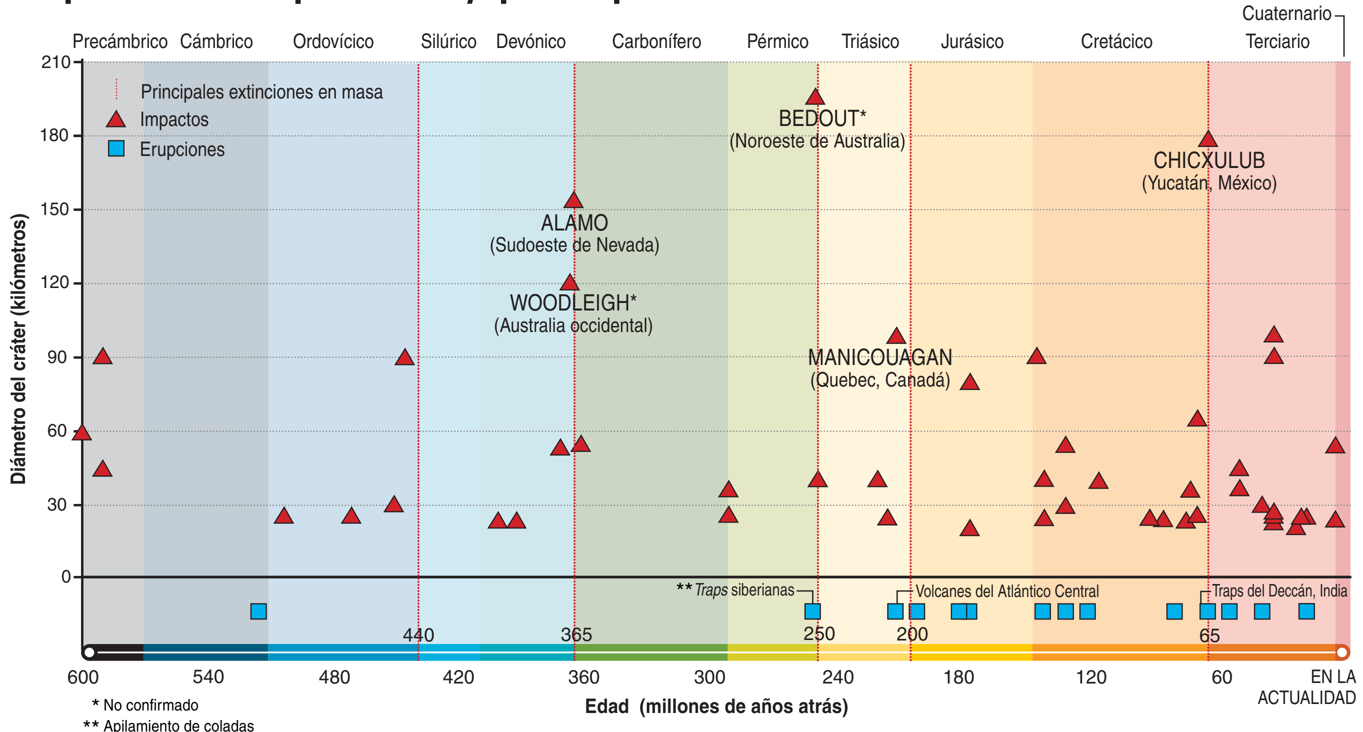
Los menos discutibles de los cuatro trazadores de impacto primarios que aparecieron en el decenio de 1980 fueron el hollín y las cenizas que, como consecuencia de los incendios provocados por los impactos, alcanzaron niveles decenas de miles de veces más altos que los normales. La prueba más convincente a favor de la hipótesis del impacto, sin embargo, fue la identificación del propio cráter, hoy conocido como Chicxulub, en Yucatán, México. Poco después de que los Alvarez hicieran público su descubrimiento en 1980, los geofísicos Tony Camargo y Glen Penfield, de la empresa nacional mexicana de petróleo PEMEX, informaron de la existencia de una inmensa estructura circular —cuyo diámetro se estimó después en unos 180 kilómetros— cuando buscaban nuevos campos de petróleo y gas enterrados en el golfo de México. Otros confirmaron la existencia del cráter en 1991.

El hallazgo de un verosímil cráter de impacto marcó un punto crítico en la búsqueda de las causas de las perturbaciones climáticas extremas y las extinciones en masa; la apartó de las fuentes terrestres, como el vulcanismo, y la orientó hacia los episodios singulares y catastróficos. Tanto los volcanes como los choques expulsan hacia la atmósfera enormes cantidades de contaminantes tóxicos —cenizas, dióxidos de carbono y azufre— que desencadenan violentos cambios climáticos y degradación ambiental. La diferencia estriba en el tiempo que perduran sus efectos. La liberación instantánea derivada de un impacto puede eliminar las especies en unos miles de años; el vulcanismo en gran escala continuaría expulsando los contaminantes a lo largo

Resumen/¿Un bombardeo mortífero?

- Unos 60 meteoritos de cinco o más kilómetros de diámetro han chocado con la Tierra a lo largo de los últimos 600 millones de años. Los más pequeños excavaron cráteres de 95 kilómetros de anchura.
- La mayoría de los científicos está de acuerdo en que uno de esos impactos eliminó los dinosaurios. Hasta hace poco, sin embargo, carecíamos de indicios que vincularan choques imponentes de cuerpos celestes con otras extinciones en masa.
- Se están ahora descubriendo indicios de antiguos impactos en puntos que marcan las cinco máximas extinciones en masa de la historia, la peor de las cuales eliminó el 90 por ciento de las especies.





de millones de años, prolongando sus efectos sobre la vida y su hábitat.

Mientras los geólogos continuaban buscando cráteres y otros trazadores de impacto, los paleontólogos corroboraban la hipótesis del impacto. Se habían inclinado durante mucho tiempo por aceptar la teoría del vulcanismo porque la desaparición de especies en el registro fósil parecía ser gradual. Un convincente argumento en contra de esta suposición fue el de los paleontólogos Philip Signor, de la Universidad de California en Davis, y Jere Lipps, actualmente en Berkeley. En 1982 se percataron de que el enfoque que se aplicaba a determinar la última vez que estaba presente una especie no tomaba en consideración el carácter incompleto del registro fósil ni los sesgos introducidos por la manera en que se recogían los fósiles.

En adelante, muchos investigadores realizaron estudios de alta resolución con múltiples especies. Estas apreciaciones, estadísticamente más fidedignas, indican que los períodos reales de extinción al final del Cretácico —y al final del Pérmico— fueron bruscos (miles de años) en lugar de graduales (millones de años). Aunque el cambio climático inducido por el vulcanismo contribuyó sin duda a la eliminación de algunas especies, la vida estaba en vías de recuperación antes de que el vulcanismo cesara, lo que hace más convincente la hipótesis del impacto.

Pasajeros extraterrestres

La aceptación de la brevedad del episodio de la Gran Extinción impulsó la búsqueda de cráteres y trazadores de impacto que tuvieran relación con ella. Hacia principios del decenio de 1990, los artículos científicos hablaban de la presencia de iridio y cuarzo con huellas de choque en rocas de fines del Pérmico; no obstante, las concentraciones que se citaban eran de 10 a 100 veces más bajas que las de las arcillas de fines del Cretácico. Apoyados en ese hallazgo, algunos paleontólogos afirmaron que el impacto que marcó el final de la era de los dinosaurios fue tan peculiar y único como estos animales.

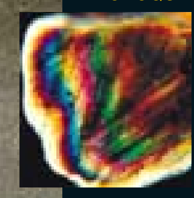
Otros científicos razonaron que quizá se había producido un impacto, si bien las rocas no conservaron las huellas que tan evidentes eran en las muestras de las postrimerías del Cretácico. Al final del período Pérmico, las masas terrestres se habían configurado en un supercontinente, Pangea, y un superocéano, Panthalassa. Un asteroide o cometa que incide en una parte profunda de un océano no genera cuarzo con huellas de choque; el cuarzo es un mineral raro en la corteza oceánica. Tampoco el choque comporta necesariamente la dispersión de iridio por todo el mundo; no se expulsarían a la atmósfera tantos restos. Para apoyar la hipótesis de un impacto oceánico como causa de extinciones más antiguas, la Gran Extinción por ejemplo, iban a hacer falta nuevos trazadores.

Uno de los trazadores de impacto que aparecieron a continuación en escena se le encontraría, andando el tiempo, en meteoritos y en, al menos, dos cráteres de impacto. A ese trazador se llegó gracias al descubrimiento accidental de una nueva forma de carbono. En el segundo año de mis estudios de doctorado en la Institución Scripps de Investigaciones oceanográficas en La Jolla, mi director, Jeffrey Bada, me mostró el artículo "Fullerenos", escrito por Robert F. Curl y Richard E. Smalley; [INVESTIGACIÓN

Indicios duraderos

Los cráteres son la mejor prueba de un impacto, pero el material expulsado por la colisión encierra también otras claves que quedan en el terreno y persisten en el archivo de las rocas durante millones de años. Estos trazadores de impacto abundan de manera especial cuando se trata de choques grandes y devastadores, como el hipotético que se ilustra aquí: un asteroide de unos 10 kilómetros de diámetro golpea violentamente sobre una línea costera, transmitiendo temperaturas de varios miles de grados y presiones un millón de veces mayores que el peso de la atmósfera terrestre.

TRAZADOR DE IMPACTO
MINERALES CON HUELLAS DE CHOQUE

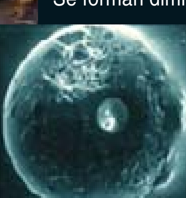


La presión y el calor extremos fracturan los cristales de cuarzo (*izquierda*) y metamorfosean los granos de hierro-níquel-silicio.

TRAZADOR DE IMPACTO
ROCAS DEFORMADAS

Las ondas de choque quedan capturadas en las rocas en forma de conos de fractura (*izquierda*). El lecho rocoso se rompe; parte de los fragmentos expulsados crean al depositarse, los conglomerados que reciben el nombre de brechas.

TRAZADOR DE IMPACTO
MICROESFERULAS



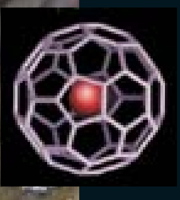
Se forman diminutas gotas de vidrio durante el rápido enfriamiento de la roca fundida que salta a la atmósfera.

TRAZADOR DE IMPACTO
IRIDIO



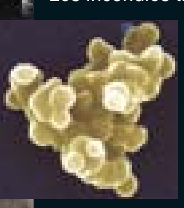
Este elemento, que es raro en las rocas terrestres pero abundante en algunos meteoritos, puede retenerse en una capa de arcilla depositada tras la explosión.

TRAZADOR DE IMPACTO
FULLERENOS EXTRATERRESTRES



Moléculas de carbono dispuestas formando una jaula aprisionan gases nobles extraterrestres en el espacio y viajan hasta la Tierra en el meteorito que se estrellará contra ésta.

TRAZADOR DE IMPACTO
HOLLIN Y CENIZAS



Los incendios transforman la vegetación en hollín, que se acumula hasta niveles decenas de miles de veces más altos de lo normal.



Y CIENCIA, diciembre 1991]. Describía el descubrimiento de una nueva forma de carbono, unas estructuras cerradas, como si fueran jaulas, llamadas fullerenos (a veces también buckminsterfullerenos o "buckybolas", en honor del inventor de las cúpulas geodésicas, a las que recuerdan). Un grupo de astroquímicos y quimicofísicos había creado inadvertidamente fullerenos en 1985 en el curso de unos experimentos de laboratorio encaminados a reproducir la formación de unos aglomerados de carbono conocidos como "polvo estelar" en algunas estrellas. Experimentos adicionales revelaron que los fullerenos, a diferencia del diamante y el grafito, las otras formas sólidas de carbono, eran solubles en disolventes orgánicos, propiedad que serviría para demostrar su existencia y les valdría el premio Nobel de química a Curl, Smalley y Harold W. Kroto en 1996.

Sabiendo que el polvo estelar, al igual que el iridio, se deposita en nuestro planeta en forma de polvo cósmico, asteroides y cometas, decidimos buscar esas exóticas moléculas de carbono en sedimentos terrestres. Elegimos un punto de impacto conocido —el cráter de Sudbury, Ontario, de 1850 millones de años de antigüedad— a causa de su singular recubrimiento de brecha (un conglomerado de rocas destrozadas por el choque y otros residuos más finos depositados tras éste) rica en carbono. De modo no muy distinto de lo que ocurrió con la controversia del Chicxulub, hizo falta descubrir cuarzo con huellas de choque y conos de fractura —una suerte de ondas de choque capturadas en la roca— para convencer a los más de que el cráter era la huella de un impacto y no tenía un origen volcánico.

Puesto que el fullereno es una molécula de carbono puro, la brecha de Sudbury ofrecía un punto ideal para recoger muestras prometedoras, lo que hicimos en 1993. Aprovechando las propiedades únicas de solubilidad del fullereno, separé en el laboratorio las moléculas más estables: las constituidas por 60 o 70 átomos. Las siguientes preguntas clave eran: ¿fueron los fullerenos pasajeros del asteroide hasta la Tierra y sobrevivieron al catastrófico choque? ¿O se generaron en el intenso calor y altas presiones del suceso?

Mientras tanto, Martin Saunders y sus colaboradores, de la Universidad de Yale, y Robert Poreda, de la Universidad de Rochester, desbrozaban un camino para resolver el dilema. En 1993, Saunders y Poreda demostraron que los fullerenos tienen la infrecuente aptitud de capturar gases nobles —helio, neón, argón— dentro de sus estructuras en jaula. Tan pronto como Bada y yo nos enteramos de este descubrimiento, en 1994, pedimos a Poreda que examinara nuestros fullerenos de Sudbury. Sabíamos que la composición isotópica de los gases nobles observada en el espacio (la medida en los meteoritos y el polvo cósmico) difería de la que tenían los hallados en la Tierra. Eso significaba que había un método sencillo para averiguar dónde se originó nuestro carbono exótico: medir la composición isotópica de los gases en su interior.

Vecindad brutal

Se amplía la búsqueda de asteroides que cruzan la órbita terrestre

El 7 de enero una roca del tamaño de una manzana de casas recordó a todos cuán atestado está realmente el sistema solar. Con sus escasos 300 metros de diámetro, el asteroide 2001 YB5 pasó inadvertido hasta fines de diciembre, pero encerraba potencia suficiente para excavar un cráter del tamaño de una ciudad si hubiera chocado contra la Tierra. Por fortuna, no se acercó a la Tierra a menos de 830.000 kilómetros (alrededor del doble de la distancia a la Luna), y no correremos peligro de chocar con el YB5 durante, al menos, varios siglos.

Pero, ¿qué pasa con los otros 1500 asteroides conocidos y próximos a la Tierra, que se han separado del cinturón principal de asteroides, situado entre Marte y Júpiter, y ahora plantean un riesgo potencial de impacto? Hay rocas espaciales del tamaño de YB5 que pasan casi cada año así de cerca de la Tierra, dice David Morrison, del Centro de Investigación Ames de la NASA, pero sólo chocan con ella cada 20.000 o 30.000 años.

Hallar los objetos peligrosos mucho tiempo antes de que se conviertan en una amenaza es el objetivo del nuevo centro de información británico sobre los Objetos Próximos a la Tierra (NEOS, de Near-Earth Objects), en el Centro Nacional de Ciencias del Espacio, en Leicester. Los cazadores de asteroides del centro británico y de otras instituciones de diversas partes del mundo se ocupan especialmente de los objetos de un kilómetro de diámetro, el menor tamaño, se calcula, requerido para desencadenar una catástrofe global. La probabilidad de que se produzca una en los próximos cien años se estima entre uno en 4000 y uno en 8600, de acuerdo con cálculos recientes de Alan Harris, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, en Pasadena, California. Gracias al programa Vigilancia Espacial de la NASA, ya en marcha, que se propone hallar para el año 2008 el 90 por ciento de los asteroides de ese tamaño o mayores que cruzan la órbita terrestre, se afinará esta predicción.

—Sarah Simpson, de la redacción



Lo que encontramos nos ha seguido asombrando hasta el día de hoy. Los fullerenos de Sudbury contenían helio, con una composición similar a la de algunos meteoritos y el polvo cósmico. Llegamos a la conclusión de que las moléculas debieron resistir el impacto, pero ¿cómo? Los geólogos coinciden en que el meteorito que chocó en Sudbury tenía al menos ocho kilómetros de diámetro. Las simulaciones por ordenador predijeron que todos los compuestos orgánicos de un asteroide o cometa de este tamaño se vaporizarían como consecuencia del impacto. Tal vez era más preocupante todavía la falta inicial de pruebas tangibles de la existencia de fullerenos en los meteoritos.

También a nosotros nos sorprendía que los fullerenos hubiesen persistido. Pero en cuanto a su aparente ausencia de los meteoritos, sospechamos que los investigadores anteriores no habían buscado todos los tipos conocidos. En el experimento original, el ideado para simular el polvo estelar, se formó, además de las moléculas de 60 a 70 átomos, una familia de grandes fullerenos. Por una corazonada, probé a separar fullerenos así de algunos meteoritos ricos en carbono y encontré toda una serie de jaulas, hasta con 400 átomos de carbono. Como las análogas del cráter de Sudbury, aunque menores, estas estructuras mayores contenían helio, neón y argón extraterrestres.

Con el descubrimiento de los fullerenos gigantes en los meteoritos, Poreda y yo decidimos poner a prueba nuestro nuevo método en sedimentos asociados a extinciones en masa. Volvimos a estudiar las muestras de fullerenos que otros habían descubierto en sitios de finales del Cretácico. Un grupo, dirigido por Dieter Heymann, de la Universidad Rice, había propuesto que el carbono exótico era parte del hollín que se acumuló a causa de los enormes incendios desencadenados por los impactos. Desprenderían un calor tan intenso como para transformar el carbono de las plantas en fullerenos, pero eso no podía explicar el helio extraterrestre que hallamos en su interior.

Animados por este éxito, nos preguntamos si en otras partes del registro fósil no serían también los fullerenos un indicador fidedigno de grandes impactos. Los sedimentos asociados con la Gran Extinción se convirtieron en nuestro objetivo siguiente. En febrero de 2001 informamos sobre el helio y argón extraterrestres de yacimientos de las postrimerías del Pérmico de China y Japón. En los últimos meses hemos empezado a explorar en la Antártida puntos también de finales del Pérmico. Las investigaciones preliminares de unas muestras del Pico del Grafito indican la presencia en ellas de fullerenos que contienen helio y argón extraterrestres. Estos fullerenos de finales del Pérmico están también asociados a cuarzo con huellas de choque, otro indicador directo de impacto.



La autora

LUANN BECKER lleva estudiando los trazadores de impactos desde 1990. En 1998 participó en una expedición de recogida de meteoritos en la Antártida y en julio de 2001 le fue otorgada la Medalla de Servicio Antártico de la Fundación Nacional de la Ciencia. Al mes siguiente entró a formar parte del cuerpo docente de la Universidad de California en Santa Bárbara, donde continúa estudiando los fullerenos y gases exóticos aprisionados en ellos en cuanto trazadores de impactos.

Por apasionantes que hayan sido estos nuevos trazadores de impacto ligados a la Gran Extinción, sería erróneo inferir que los fullerenos constituyen la prueba inequívoca de un impacto gigantesco. Muchos todavía sostienen que el vulcanismo es la causa más probable. Algunos han sugerido que el polvo cósmico es un mejor indicador de un episodio de impacto que los fullerenos. Otros preguntan por qué indicios tales como el cuarzo con huellas de choque y el iridio son tan raros en las rocas asociadas a la Gran Extinción, y seguirán manteniéndose escépticos mientras no vean un cráter de impacto.

Avanzando constantemente

Impávidos ante el escepticismo, un pequeño grupo continúa buscando posibles trazadores y cráteres de impacto. Recientemente, John Gorter, de AGIP Petroleum, en Perth, describió lo que parece ser un enorme cráter de impacto de finales del Pérmico, enterrado bajo una gruesa capa de sedimentos en el mar, cerca de la costa del noroeste de Australia. Gorter da esa interpretación a una línea sísmica de la región que sugiere una estructura circular, el Bedout la llaman, de unos 200 kilómetros de diámetro. Si un futuro descubrimiento de cuarzo con huellas de choque u otros trazadores de impacto demuestra que allí se produjo un impacto capaz de alterar la vida, su localización podría ser la explicación de que se hayan encontrado fullerenos extraterrestres en China, Japón y la Antártida, regiones próximas, pero no en puntos más distantes, como Hungría e Israel.

También son esperanzadores los recientes descubrimientos de otros trazadores propuestos como productos directos de un impacto. En septiembre de 2001, el grupo encabezado por Kunio Kaiho, de la Universidad de Tohoku, informó de la presencia de granos de hierro, sílice y níquel metamorfoseados por un impacto en las mismas rocas de finales del Pérmico de Meishan, China, donde se han acumulado las pruebas de una brusca extinción y de la presencia de fullerenos extraterrestres. Se ha informado también de la presencia de tales granos en varios puntos de impacto de las postrimerías del Cretácico en otras partes del mundo.

A falta de cráteres u otras indicaciones directas, quizá sea todavía posible determinar si se ha producido un impacto observando síntomas de cambios ambientales o biológicos rápidos. Según Peter Ward, de la Universidad de Washington, existen indicios, en las rocas de finales del Pérmico del Karoo sudafricano, de una extinción súbita de las plantas superiores. Varios grupos han descrito también un brusco descenso de la productividad de especies marinas asociado con la Gran Extinción (y, en rocas de finales del Triásico de unos 200 millones de años de antigüedad, con la cuarta de las cinco grandes extinciones en masa). Estos hundimientos de la productividad, indicados por una alteración de los valores de los isótopos del carbono, se correlacionan con un registro similar de finales del Cretácico, época de la que pocos científicos dudan de que conoció un violento choque.

Sólo una investigación más cuidadosa determinará si los nuevos trazadores de impacto —productos directos de un choque y señales indirectas de un brusco cambio ecológico— serán fidedignos. Hasta ahora, se ha visto que en las rocas que registran tres de las cinco más devastadoras crisis biológicas de nuestro planeta existen varios tipos de pruebas de un impacto. Para las otras dos mayores extinciones —una hace unos 440 millones de años y la otra unos 365 millones de años— se ha informado de la presencia de iridio, cuarzo con huellas de choque, microesférulas, posibles cráteres y hundimiento de la productividad; no obstante, la conexión causal entre el impacto y las extinciones es todavía, en el mejor de los casos, débil. Importa observar, sin embargo, que los trazadores de impacto que tipificase el final del Cretáceo no estarían tan marcados en las rocas ligadas a extinciones en masa más antiguas.

La idea de que pudo haber varios choques gigantescos es apasionante por sí misma. Pero quizás impresione aún más la exigencia, cada vez más clara, de que esos sucesos destructivos resulten necesarios para el cambio evolutivo. La mayoría de los paleontólogos creen que la Gran Extinción, por ejemplo, permitió el florecimiento de los dinosaurios; les abrió nichos antes ocupados por otros animales. Análogamente, los mamíferos medraron gracias a la desaparición de los dinosaurios. Fuera la que fuese la razón de las extinciones en masa, posibilitó también nuestra propia existencia. Mientras los investigadores continúan detectando trazadores de impacto alrededor del mundo, cada vez parece más evidente que fueron colisiones de cuerpos extraterrestres las que causaron las grandes extinciones en la Tierra.

Bibliografía complementaria

IMPACT EVENT AT THE PERMIAN-TRIASSIC BOUNDARY: EVIDENCE FOR EXTRATERRESTRIAL NOBLE GASES IN FULLERENE. Luann Becker, Robert J. Poreda, Andrew G. Hunt, Theodore E. Bunch y Michael Rampino en *Science*, vol. 291, págs. 1530-1533; 23 de febrero 2001.

ACCRETION OF EXTRATERRESTRIAL MATTER THROUGHOUT EARTH HISTORY. Dirigido por Bernhard Peucker-Ehrenbrink y Birger Schmitz. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001.

La geodinamo en el laboratorio

Tras laboriosos experimentos se ha obtenido la prueba: los fluidos en rotación y conductores de la electricidad pueden crear un campo magnético estable. Gracias a ello se ha logrado simular el proceso de generación del campo magnético terrestre

Ulrich Müller y Robert Stieglitz

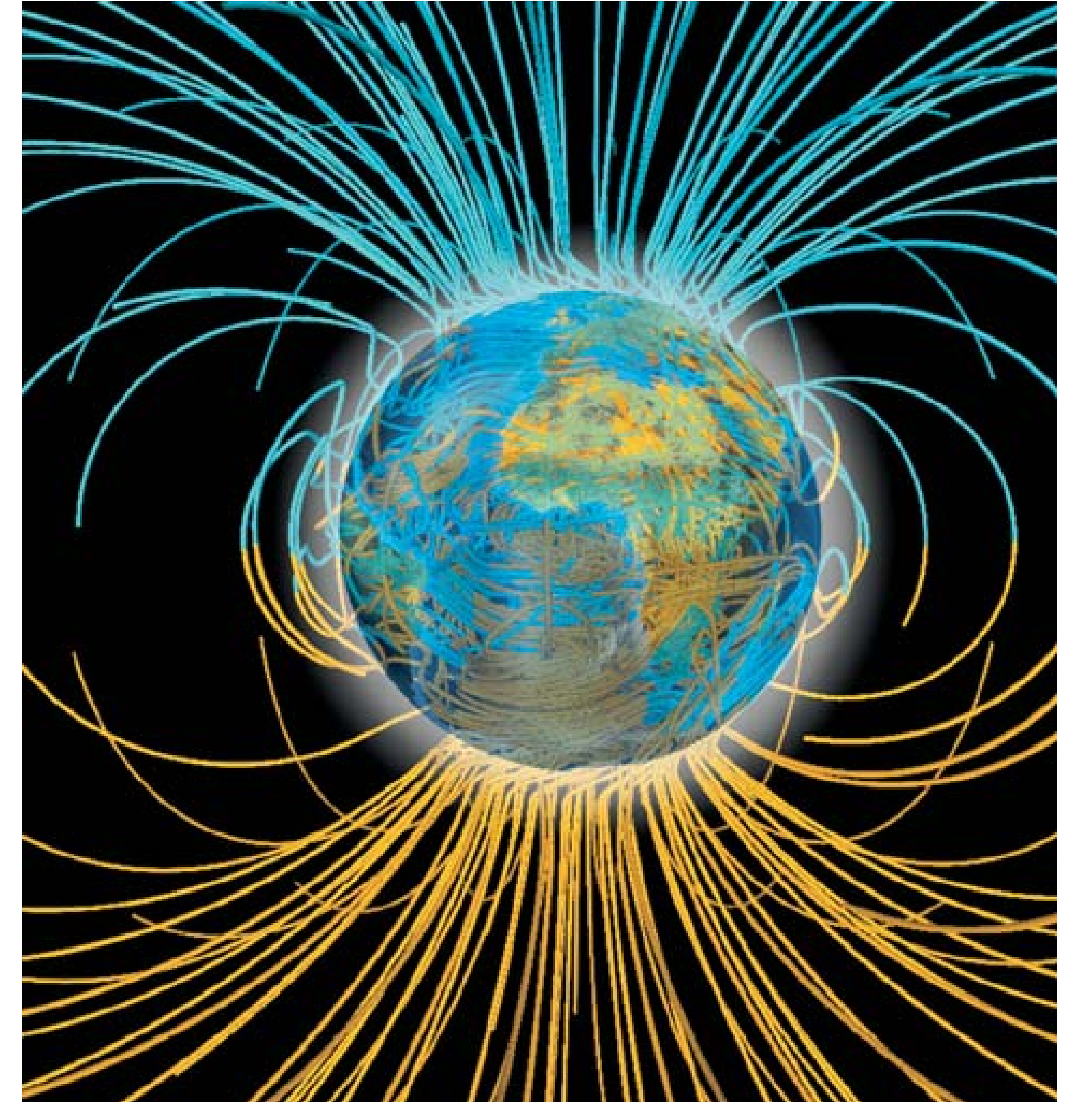
Las antiguas culturas de China y México conocían ya las propiedades de las piedras magnéticas. Se supone que fueron los marinos chinos los primeros en utilizar la orientación norte-sur de una aguja magnética. En la Edad Media, las brújulas magnéticas se impusieron entre los navegantes de Europa. El médico y naturalista William Gilbert (1544-1603) publicó en 1660 *De Magnete* (Sobre los imanes), donde compendiaba de manera sistemática el conocimiento que se tenía sobre el magnetismo y sobre el campo magnético terrestre. A partir de ciertos experimentos realizados en barcos ingleses, sobre medidas del campo magnético de la Tierra, llegó a la conclusión de que la Tierra se comportaba como un imán permanente, cuyos polos se situaban en las cercanías de los polos geográficos norte y sur.

En la superficie de la Tierra el campo geomagnético es muy pequeño, diez mil veces menor que el de un imán permanente común. Tras observaciones sistemáticas llevadas a cabo durante los últimos 150 años, se sabe que el campo magnético terrestre varía con el tiempo y el espacio. En particular, la posición precisa del polo norte magnético ha variado en centenares de kilómetros hacia el noroeste, desde la primera determinación posicional del mismo realizada en 1831 por una expedición polar británica. También la intensidad local del campo magnético en la superficie de la Tierra sufre variaciones perfectamente detectables, que tienen lugar en escalas de tiempo amplísimas, que van de escasos segundos a millones de años. Los geofísicos saben hoy en día que las fluctuaciones de alta frecuencia se deben a causas externas, provenientes de la ionosfera, mientras que las variaciones a muy largo plazo obedecen a procesos que acontecen en el interior de la Tierra.

En las variaciones de muy larga escala —variaciones seculares— se distinguen dos tipos de tendencias. Por un lado, el mapa magnético de la superficie del planeta se desplaza unos 0,2 grados al año hacia el oeste. Por otro, la intensidad del campo magnético disminuye anualmente en un 0,07 por ciento. Si se mantiene esa disminución, en unos 4000 años el campo magnético habrá desaparecido. A partir de sondas geológicas con inclusiones magnetizadas se ha podido establecer que la Tierra posee un campo magnético desde hace unos 3500 millones años y que dicho campo ha intercambiado sus polos norte y sur en centenares de ocasiones. El fenómeno se produce cada 500.000 años en promedio, siendo curioso que el intercambio de polos ocurriera siempre

Los autores

ULRICH MÜLLER y ROBERT STIEGLITZ pertenecen al Instituto de Técnicas Nucleares y Energéticas del Centro de Investigaciones de Karlsruhe. Müller, que dirigió dicho instituto hasta abril de 2000, enseña mecánica de fluidos en la Universidad Técnica de Karlsruhe. Stieglitz, jefe de proyectos, está al frente del experimento de la geodinamo.



1. VISTO DESDE EL EXTERIOR, el campo magnético terrestre presenta la estructura de un dipolo. Las líneas de campo emanan de las cercanías del polo sur magnético y entran por las cercanías del polo norte magnético. Esta simulación por ordenador, realizada por Gary A. Glatzmaier y Paul H. Roberts, muestra la compleja trayectoria de las líneas de campo por el interior de la Tierra, que aparece representada en la forma en que se observaría desde un satélite.

de manera bastante brusca, durando el proceso unos pocos miles de años [*véase* "Inversiones magnéticas y dinamo terrestre", por Kenneth Hoffman, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 1988].

Todavía en el siglo XIX suponían algunos que el campo magnético terrestre lo originaba un imán permanente de hierro situado en el interior de la Tierra. Sin embargo, las mediciones sísmicas junto con otras geofísicas efectuadas en la superficie terrestre muestran que las temperaturas del interior del planeta son muy superiores a los 800 grados centígrados, cota superior para la producción de ferromagnetismo. Hubo, pues, que descartar que un imán permanente ferrítico causara el campo magnético terrestre.

¿Podría la Tierra haber fijado en su materia, durante el período de su formación, un campo magnético externo? Un campo de estas características habría desaparecido lentamente, de acuerdo con los principios de la electrodinámica. En el caso de la Tierra habría sucedido a los 10.000 años, aproximadamente. Pero como sea que hay pruebas fehacientes de que el campo magnético terrestre ha estado ahí durante más de 3000 millones de años, surge la pregunta acerca del mecanismo que ha mantenido la magnetización del interior del planeta durante tanto tiempo y que es, además, responsable de las variaciones apuntadas,

temporales y espaciales, de dicho campo magnético.

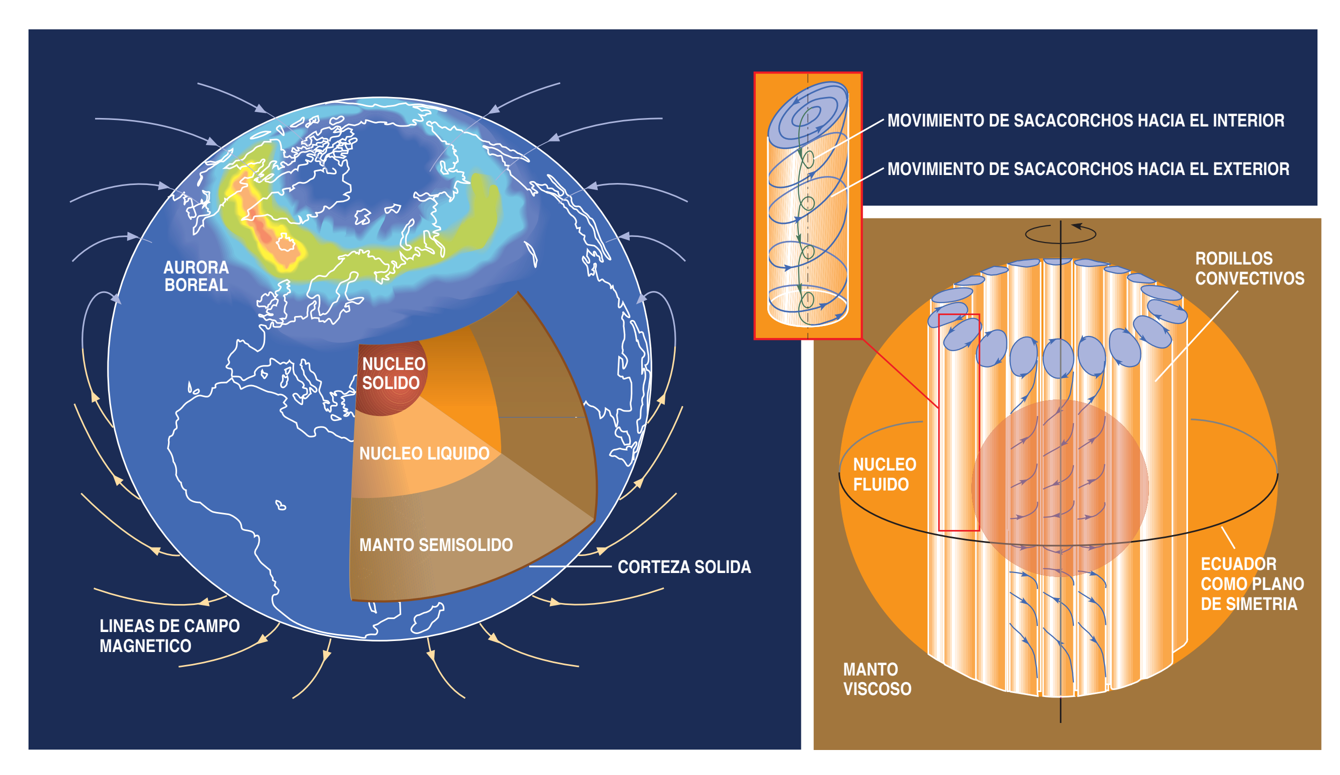
Joseph Larmor (1857-1942), profesor de física de la Universidad de Cambridge, avanzó en 1919 una primera idea sobre la posible solución de este enigma. Supuso que los campos magnéticos observados en la superficie del Sol estaban generados por la corriente eléctrica engendrada por materia conductora del interior del astro en rotación. Redujo, de esta forma, la descripción del campo magnético solar al de un puro efecto dinamo. El físico norteamericano Walter M. Elsasser y el geofísico británico Edward C. Bullard retomaron la idea hace 50 años, trasladándola a las condiciones correspondientes al campo magnético terrestre.

Una dinamo en el interior de la Tierra no podría tener en ningún caso la misma estructura que una dinamo de bicicleta, ni la correspondiente a los generadores de corriente eléctrica de una planta nuclear. En este tipo de dispositivos técnicos, una distribución complicada de espiras conductoras gira junto con un material ferrítico, lo que recibe el nombre de rotor, de manera relativa a otra disposición similar de espiras, pero en reposo, el estator, en las que induce una corriente. En el interior de la Tierra hallamos un metal fundido, que fluye; se trata de un buen conductor. En combinación con la rotación propia de la Tierra, esta amalgama conductora en movimiento puede hacer las veces de una dinamo, capaz de aumentar la intensidad de un campo magnético preexistente y de hacer que se mantenga por largo tiempo [*véase* “La evolución del campo magnético terrestre”, por Jeremy Bloxham y David Gubbins, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 1990].

El comportamiento de las corrientes y de los campos magnéticos en conductores eléctricos en movimiento —se trate de hilos o de metales fundidos— viene regido por las tres leyes fundamentales de la electrodinámica:

- Todo conductor de la corriente eléctrica está rodeado de líneas de campo magnéticas.
- En todo conductor que se desplace perpendicular a las líneas de campo magnéticas, se induce una tensión eléctrica que hace que el conductor se vea recorrido por una corriente eléctrica.
- En un fluido que sea buen conductor de la corriente eléctrica, así un metal fundido, las líneas de campo magnético dentro de la materia están prácticamente congeladas y se mueven con ella como si se tratase de bandas elásticas.

En particular, por acción de la corriente de la masa fundida pueden enderezarse, torcerse o doblarse las líneas de campo. Tales operaciones producen en el campo mag-



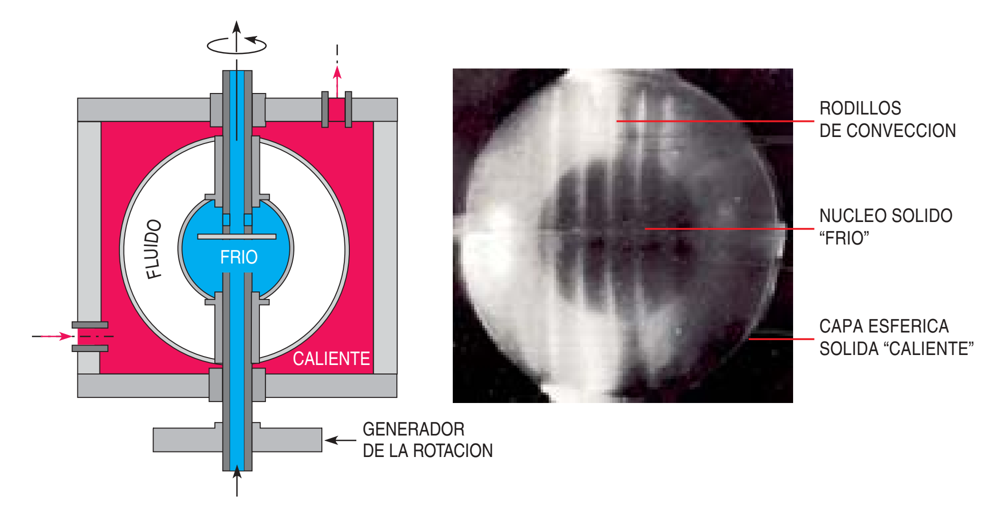
2. CUANDO LAS PARTICULAS DEL VIENTO SOLAR quedan aprisionadas por el campo magnético de la Tierra se producen en torno a los polos las auroras boreales (*izquierda*). La causa de este fenómeno hay que buscarla en el interior profundo de la Tierra: en el núcleo externo, que consiste en hierro fundido y fluido. Debido a las diferencias de densidad y a la propia rotación del planeta, se generan patrones de movimiento en forma de rodillos (*figura de la derecha*). En estos rodillos convectivos el hierro fundido se desplaza hacia el interior o hacia el exterior, según el caso. Tales corrientes del hierro conductor forman una geodinamo, que genera el campo magnético terrestre y cuya intensidad se mantiene casi constante a lo largo de mucho tiempo.

nético un trabajo mecánico, de modo que la energía del campo magnético aumenta a costa de la energía de movimiento correspondiente al desplazamiento de la corriente fluida. A ese proceso se le denomina efecto alfa.

Otro mecanismo geofísico de interés, capaz de intensificar un campo magnético débil, consiste en el enrollamiento de las líneas de campo magnético que tiene lugar cuando un remolino del fluido se ve sometido a fuerzas de cizalladura. De manera experimental, puede generarse una corriente de este tipo cuando un fluido llena el espacio entre dos superficies esféricas concéntricas que giran con velocidades distintas. A semejante situación se la conoce por efecto omega. Cuando se presenta en combinación con un efecto alfa (por ejemplo, por la generación de un movimiento de remolino adicional dentro de la corriente que fluye entre las dos esferas), se cierra entonces un ciclo de autointensificación del campo. En este contexto los físicos hablan de una dinamo alfa-omega.

En el núcleo de la Tierra, compuesto por un fluido conductor metálico derretido, podrían quizás intervenir ambos mecanismos [véase "Origen del campo magnético terrestre", por Charles R. Carrigan y David Gubbins, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1979]. Los mecanismos cinemáticos de dinamo aquí descritos son aún demasiado provisionales para dar cuenta de todas las propiedades observadas del campo magnético terrestre. Hay que tomar en consideración los procesos termodinámicos que tienen lugar en una corriente metálica fundida.

Pese a que las mediciones directas en la corteza terrestre sólo son posibles hasta una profundidad de unos pocos kilómetros, los geofísicos han adquirido un conocimiento bastante detallado de la constitución de nuestro planeta. A ello han contribuido significativamente los análisis precisos de las ondas de los terremotos que se propagan desde el interior de la Tierra, así como las aportaciones de estimaciones procedentes de la termodinámica en general. Así, a partir de una ecuación de equilibrio calorífico en la superficie terrestre y de la estratificación de la densidad en el interior se han determinado la presión y temperatura reinantes en el núcleo terrestre. La presión alcanza allí unos 3500 millones de pascales, es decir, unos 3,5 millones de veces la presión atmosférica a nivel del mar (que es de unos 1000 pascales), mientras que la temperatura llega a los 6300 grados centígrados.



3. A FINALES DE LOS AÑOS SETENTA, Charles Carrigan y Friedrich Busse demostraban, en la Universidad de California en Los Angeles, que en el núcleo fluido de la Tierra podía generarse un patrón de movimiento en forma de rodillos. Sometieron a un fluido, encerrado entre dos cáscaras esféricas, fría la interior y caliente la exterior, a una rotación rápida (*imagen de la izquierda*). Debido a la acción conjunta de fuerzas de convección y de Coriolis se desarrolló en el fluido un patrón con rodillos, que se manifestó bajo el aspecto de franjas brillantes (*imagen de la derecha*).

La parte interior del núcleo, con un radio de unos 1200 kilómetros, consta de hierro y níquel sólidos. Se halla rodeada, en una extensión de 2200 kilómetros, por una densa corona metálica fundida, fundamentalmente de hierro con una pequeña proporción de níquel, azufre, silicio y oxígeno. La formación del núcleo metálico está, pues, ligada a una buena conductividad eléctrica y térmica. En torno al núcleo se sitúa, envolviéndolo, el manto terrestre, de un espesor de unos 2900 kilómetros; está constituido mayoritariamente por compuestos de los elementos ligeros silicio, oxígeno y magnesio. La conductividad eléctrica y térmica de estos materiales es muy reducida. El manto terrestre presenta, a su vez, varias capas, que van de la escasa fluidez a la plastoelasticidad y que se hallan interconectadas de diverso modo. En contraposición a la fluidez de tipo "acuoso" del núcleo externo, el manto terrestre no ejerce ninguna influencia en el mecanismo de dinamo que nos ocupa.

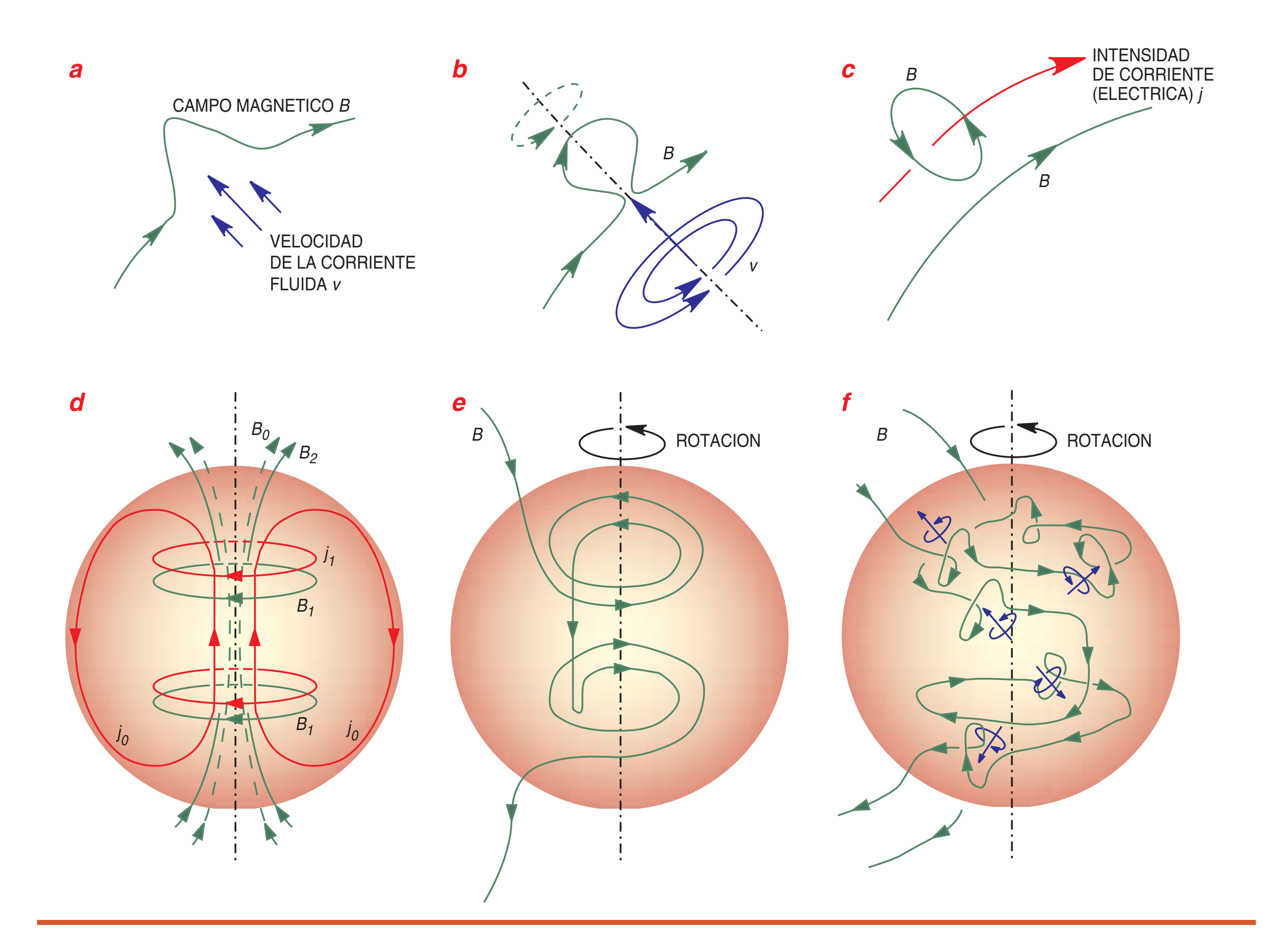
Muchísimo más que la estructura estática de la Tierra que acabamos de exponer, importan los movimientos del núcleo externo fluido de la Tierra para el mecanismo de dinamo. Debido a las diferencias de temperatura, así como de composición química de la mezcla fluida, con la profundidad, se producen gradientes de densidad con la profundidad que generan corrientes ascendentes. Tales movimientos de convección se ven influidos, sobre todo, por las diferencias de composición química; van éstas cambiando constantemente al paso que las componentes pesadas de la mezcla que se hallan en la frontera más externa del núcleo sólido se congelan. Al propio tiempo, las componentes más ligeras se sitúan en una capa fina que comienza a desplazarse en movimiento ascendente por el campo gravitatorio. La solidificación de la mezcla metálica sobre el núcleo sólido interior tiene su origen en un en-

Así se autointensifica un campo magnético

Bajo la acción de los campos de corriente de flujo en un fluido conductor, las líneas de campo magnético pueden resultar deformadas (*a*) e, incluso, cerradas sobre sí mismas, eso es, "cortocircuitadas" (*b*). A su vez, la línea de campo cerrada queda ligada a una corriente eléctrica (*c*). Para determinados valores de la corriente de flujo, la corriente eléctrica procede en la dirección del campo magnético original. A tal comportamiento se le denomina efecto alfa.

Al repetirse este mismo proceso en una porción de una línea de campo magnético que ya está cerrada, se produce una intensificación del campo magnético original en virtud de una retroalimentación mecánica (*d*). Se trata de otro elemento importante del proceso de dinamo.

En la autointensificación del campo magnético puede intervenir un segundo efecto, a saber, el que acontece cuando en unos remolinos de fluido sobre los que actúan fuerzas de cizalladura se produce el rebobinado de líneas de campo magnético (*e*). Cuando este efecto omega, así se llama dicho tipo de acción, se superpone al efecto alfa ya descrito, se cierra el ciclo de autointensificación buscado (*f*).



friamiento incesante de nuestro planeta. La Tierra radia de manera permanente 0,08 watt caloríficos por metro cuadrado de superficie.

Si no se diera la rotación terrestre, los movimientos convectivos de transferencias de calor y de materia desarrollados en la región fluida se producirían de manera casi por entero radial y a una velocidad muy reducida, de un milímetro por segundo. Sin embargo, debido a la rápida rotación de nuestro planeta, que se traduce en el núcleo fluido en velocidades medias de unos diez a treinta metros por segundo, se originan vigorosas fuerzas de Coriolis, en dirección perpendicular al movimiento ascendente, y que actúan sobre la materia fluida fundida. Friedrich Busse, de la Universidad de Bayreuth, demostró en los años setenta en la Universidad de California en Los Angeles que así se creaban estructuras de corriente ordenadas bajo la forma de rodillos de convección, cuyos ejes se sitúan en alineación paralela al eje de rotación de la Tierra (*véase la figura 2*).

Dichos rodillos convectivos forman un anillo en torno al núcleo sólido de la Tierra. Dependiendo de la fuerza de los movimientos de rotación y convección, tales rodillos pueden aparecer constituyendo

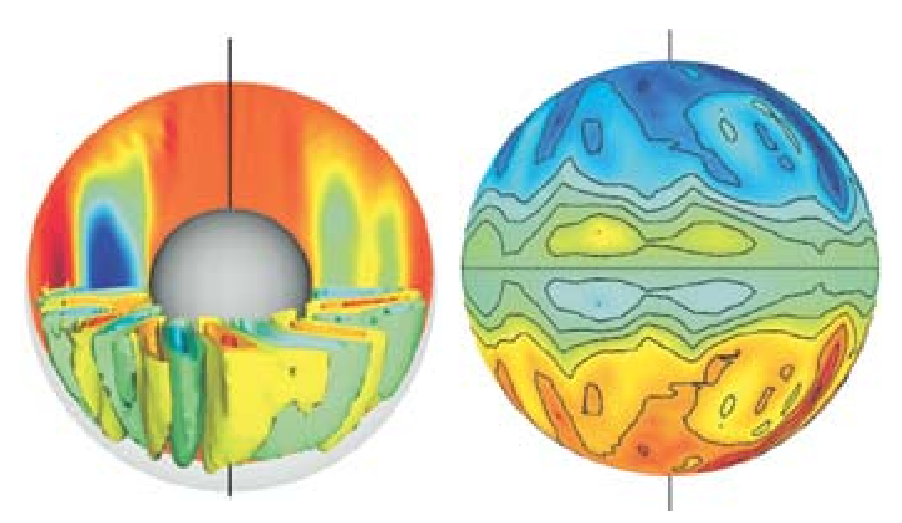
varias capas distintas, unas junto a otras. Cada rodillo convectivo queda confinado por una pared "sólida" de material viscoso-plástico que integra la parte interior del manto terrestre. El frenado del movimiento de convección que tiene lugar en esta frontera genera una corriente dirigida hacia el centro del rodillo; en virtud de ello, se origina una corriente espiral casi concentrada en el eje del rodillo y dirigida hacia abajo, intensificada por fuerzas descendentes. Este fenómeno se produce de manera especularmente simétrica en la mitad norte y en la mitad sur de la esfera terrestre. Visto en conjunto desde fuera, en la parte externa, fluida, del núcleo terrestre aparece una distribución, bastante bien ordenada, de remolinos, que ofrece una estructura de velocidades helicoidal.

En experimentos llevados a cabo a finales de los setenta en la Universidad de California en Los Angeles, Charles Carrigan y Friedrich Busse demostraron la formación de las estructuras predicha por tales modelos. Carrigan situó fluidos en un volumen dispuesto en capas esféricas en rotación rápida (unas 1000 revoluciones por minuto). Mediante el calentamiento de la capa más externa y enfriamiento de la más interna generó un gradiente de temperaturas que produjo una corriente de convección térmica. Surgieron al mismo tiempo espirales en rodillo de ejes paralelos al eje de rotación del fluido.

Pero, ¿puede ahora un sistema de rodillos de este tipo generar un campo magnético y mantenerlo indefinidamente? Para resolver la cuestión hubo que esperar el advenimiento de computadores de capacidad suficiente para realizar los cálculos correspondientes. Durante los diez últimos años, grupos de investigadores de los Estados Unidos, Japón, Alemania e Inglaterra han trabajado en el cálculo numérico de las condiciones magnetohidrodinámicas espaciales que tienen lugar en el interior de la Tierra, con el propósito de simular la geodinamo. Se ha conseguido así modelar, con notable éxito, sistemas complejos formados de manera interdependiente por corrientes fluidas, movimientos de rotación, corrientes eléctricas y campos magnéticos. Y se ha logrado reproducir el efecto dinamo de manera numérica en muchos de sus detalles para estructuras que imitan en su geometría y composición las condiciones del interior de la Tierra.

Pero la capacidad de cálculo de los grandes ordenadores no alcanza, ni siquiera hoy, para simular las condiciones reales de evolución del interior de la Tierra a las escalas de tiempo de especial interés geofísico, que van desde días hasta unos 10 millones de años, a escalas espaciales de 10 a 3500 kilómetros. No obstante tales limitaciones, se ha podido describir un gran número de fenómenos geomagnéticos y confirmar toda una serie de hipótesis sobre el comportamiento de las corrientes del fluido, con una precisión muchas veces asombrosa. Gary Glatzmaier, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y Paul Roberts, de la Universidad de California en Los Angeles, presentaron en 1995 una primera simulación del campo magnético de forma dipolar de la Tierra (*véase la figura 1*). Describieron también los cambios de polarización y el desplazamiento del polo norte magnético hacia el oeste.

Varios grupos de investigación de distintos países —entre ellos, el de Friedrich Busse, Andreas Tilgner y Eike Grote en la Universidad de Bayreuth— intentan calcular con el mayor detalle posible la interacción entre las corrientes convectivas de las capas esféricas y un campo magnético autogenerado. Dos fenómenos merecen destacarse: los rodillos son aplanados espiralmente sobre su sección perpendicular al eje de rotación por acción de las fuerzas de Coriolis; las líneas zonales del campo magnético, para latitudes medias, aparecen deformadas en ondas por la influencia de la acción de transporte del remolino convectivo.



4. UNA SIMULACION por computador llevada a cabo por investigadores de la Universidad de Bayreuth nos reveló dos detalles importantes. La sección transversal de los rodillos de convección que genera una dinamo dentro de una cáscara esférica metálica en rotación sufre un aplanamiento espiral (*izquierda*, en la que se representan superficies correspondientes a la misma velocidad, en la dirección radial en la parte inferior del gráfico; en la superior se ilustra un corte según un meridiano). Obsérvese que las líneas de la misma componente radial del campo magnético en la superficie externa de la cáscara esférica no corren paralelas al ecuador, sino que, debido al efecto de transporte del remolino convectivo, sufren una deformación en forma de onda para latitudes medias (*derecha*). En azul se representan los valores negativos, y en rojo los positivos, de la componente radial del campo magnético. El color verde claro corresponde a valores nulos de la intensidad del campo.

Para la simulación experimental de la dinamo hubo que construir un complicado dispositivo. La base teórica del experimento era la creación de un campo de corriente fluida tal como había sido sugerido por Glyn Roberts, de la Universidad de Newcastle upon Tyne. Se disponen en una configuración de retículo periódico unos remolinos que van girando, de manera alternada a derechas y a izquierdas. Por ellos se hace pasar un flujo de corriente, también alternativamente hacia arriba y hacia abajo (*a*). Friedrich Busse, de la Universidad de Bayreuth, junto con los autores de este artículo, convirtieron este campo de corrientes teórico en un proyecto técnico materializable. Para ello se diseñaron 52 celdas de remolino (*b*) situadas en un cilindro de unos dos metros de diámetro (*c*). En la figura se destacan en verde dos de dichas celdas, mostrando su estructura interna con sus conexiones mediante codos tubulares en los extremos. Una lámina arrollada se encarga de que la corriente de flujo discurra en espiral.

Siguiendo este esquema preciso, se construyó en el Centro de Investigaciones de Karlsruhe un experimento real. El módulo cilíndrico de dinamo (*foto de la izquierda*) contiene en su interior 52 generadores de remolinos que se hallan unidos dos a dos por medio

A tenor de la teoría, sólo podrá conseguirse una confirmación en el laboratorio de la geodinamo con un gran dispositivo experimental. Hay que apartarse, pues, en varios aspectos del modelo geofísico. Por ejemplo, las fuerzas ascensionales del interior de la Tierra que impulsan los procesos convectivos, ¿cómo hay que simularlas en el laboratorio: mediante bombas de presión o mediante rotores? En lugar del problema real de la dinamo geofísica aparece un problema de dinamo que recibe el calificativo de cinemático, con una corriente de remolinos espacial prescrita de antemano.

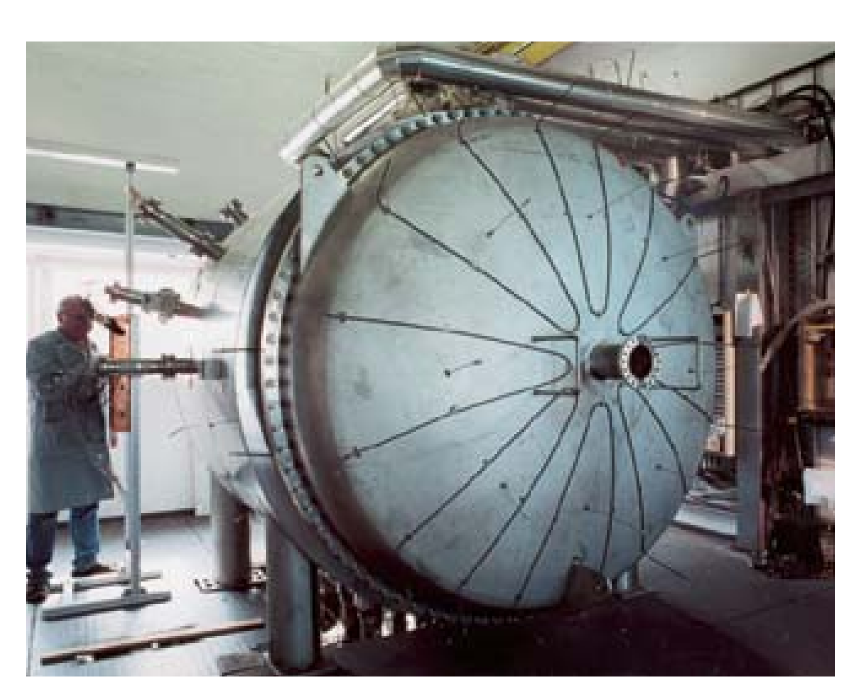
El problema cinemático se parecerá tanto más al problema geodinámico cuanto más similar sea el campo de corriente que se utilice en el experimento, al campo geodinámico de la parte fluida del núcleo terrestre. La fiabilidad de los datos obtenidos en un tal experimento dependerá de la calidad del fluido de prueba (sus propiedades eléctricas, térmicas y fluidomecánicas), así como de la calidad de la bomba de presión o rotor que se utilice. Las mediciones realizadas con los aparatos de prueba deben mostrar que el aumento de la energía magnética, obtenido mediante el estiramiento y la torsión mecánicas de las líneas de campo magnético, puede compensar ventajosamente la pérdida de dicha energía por culpa de la resistencia óhmica de los materiales.

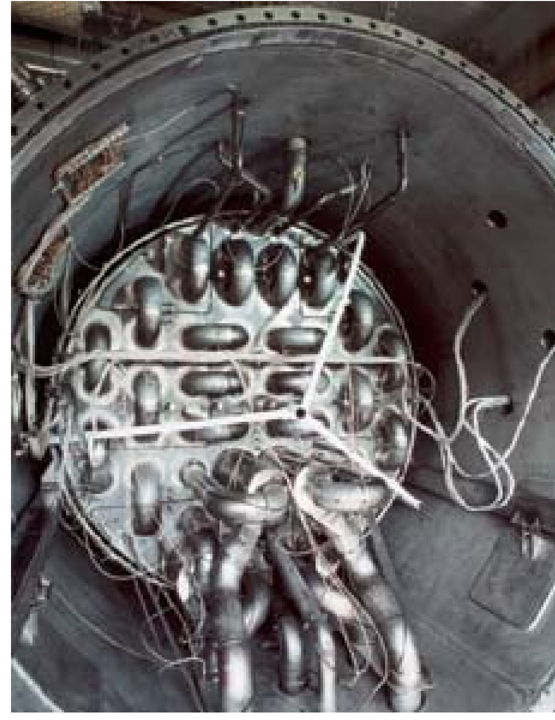
Una medida de ello nos la ofrece el número de Reynolds magnético. Se trata de un número característico adimensional que es igual al producto de tres factores: una velocidad de corriente promedio del conductor fluido, una magnitud típica del remolino y dos propiedades del material (la conductividad eléctrica y la permeabilidad magnética). El número de Reynolds

de codos tubulares de manera que se obtiene un circuito cerrado de corriente (*foto de la derecha*). Gracias a esta disposición pudo bombearse en el circuito una corriente de sodio fluido con un flujo inyectado de 50 a 150 metros cúbicos por hora. Dos bombas se encargan de las corrientes de remolino de los espacios anulares, mientras que una tercera lo hace de la corriente axial que recorre el tubo.

Aquí el propio campo magnético terrestre hace las veces de "campo semilla" para la dinamo (¡siendo al propio tiempo su explicación el motivo de todo el experimento!). Cuando el volumen de corriente inyectada adquiere un valor suficiente, se crea un campo magnético en un dominio amplio del espacio, cuya intensidad sufre variaciones debido a las fluctuaciones turbulentas en la corriente de sodio fluido, pero cuyo promedio temporal es estacionario. La intensidad del campo magnético engendrado centuplica la del campo magnético terrestre.

El momento exacto en que se produce una autointensificación del campo magnético depende de la combinación adecuada del volumen de corriente que forma los remolinos y el volumen de corriente que recorre el eje de los tubos. El experimento se realizó para combinaciones diversas de los valores de estos parámetros. En virtud de ello, los investigadores de Karlsruhe lograron dibujar un diagrama de estado en el que una curva separa los estados en que se autogenera el campo magnético de los estados en que éste no se autogenera.





magnético describe el comportamiento de la razón entre la energía del campo magnético generada y la que se pierde.

Para obtener una prueba experimental inapelable del efecto dinamo, el número de Reynolds debe alcanzar un valor mayor que uno. A fin de lograrlo, se elige un fluido metálico que tenga la mayor conductividad eléctrica posible, muy poca viscosidad y una baja temperatura de fusión. El sodio (Na) presenta todas estas propiedades, siendo líquido a temperaturas por encima de los 97 grados centígrados. Se realizan entonces mediciones con un dispositivo experimental cuya capacidad oscila entre uno y varios metros cúbicos y admite velocidades de la corriente fluida de entre cinco y veinte metros por segundo. Dos son los grupos de trabajo que han realizado hasta el presente experimentos de estas características con éxito: uno en el Instituto de Física de Riga y el otro en el Centro de Investigaciones de Karlsruhe.

El grupo letón, bajo la dirección de Agris Gailitis, había intentado, en un primer experimento llevado a cabo en 1987, verificar el efecto dinamo con un solo remolino helicoidal, rodeado por sodio en reposo. Un tal campo de velocidades correspondería a uno de esos remolinos en forma de rodillo de la configuración del núcleo terrestre fluido que hemos descrito antes. La realización técnica se acometió con un generador de movimiento rotacional instalado en la boca de un tubo largo y ancho. El fluido retornaba a la boca del primer tubo por un segundo tubo que lo rodeaba. Para alimentar el dispositivo se servían de una bomba magnetohidrodinámica, capaz de proporcionar 1200 metros cúbicos de fluido por hora.

Con este dispositivo experimental, Gailitis y sus colaboradores llegarían a demostrar que un campo magnético introducido exteriormente se intensifica de forma perceptible por medio de la corriente espiral; comprobaron también que, una vez desconectada la fuente externa de fluido, el decaimiento de esta intensificación del campo magnético se retrasa de manera significativa. Saltaba a la vista que casi se habían conseguido las condiciones críticas para la autogeneración de un campo magnético.

El grupo letón pudo calcular el valor crítico, correspondiente al dispositivo de dinamo asociado a su experimento, del número de Reynolds magnético para el cual el campo magnético se autoalimentaría. Pero un fallo mecánico les impidió alcanzar dicho valor crítico y, con él, el estado de dinamo activa buscado. Por ello, para llevar a cabo un segundo experimento, el propio Gailitis junto con el grupo de Gunter Gerbeth, de Dresde, puso en marcha otro dispositivo experimental más simple aunque de características parecidas. Con él generaron un campo magnético oscilante casi periódico que se autoalimentaba. Por primera vez se conseguía la confirmación experimental del efecto dinamo homogéneo.

Hay un campo de velocidades, ideado por Glyn Roberts, de la Universidad de Newcastle upon Tyne, que tiene mucho que ver con el campo de corrientes de la parte fluida del núcleo terrestre. En este caso se forman remolinos, dispuestos en forma periódica, que giran alternativamente a derechas e izquierdas; en su interior circula un campo de velocidades en la dirección del eje de los remolinos y en sentido también alternante. Friedrich Busse modificó el campo de velocidades de Roberts y lo colocó en un cilindro finito. Se proponía reproducir más fielmente las condiciones que hay en el interior de un planeta en rotación, en particular los remolinos que allí aparecen. Busse calculó que, en estas condiciones, con un valor relativamente bajo del número de Reynolds magnético, de diez aproximadamente, se conseguiría la generación y autoalimentación del campo magnético. Para alcanzar experimentalmente semejante valor del número de Reynolds se precisaría un cilindro de prueba de un metro de radio por un metro de altura. La velocidad del fluido de prueba, sodio de nuevo, debía ser, para un dispositivo con 52 celdas con remolinos, de unos cinco a diez metros por segundo. Busse sugirió, en consecuencia, que había que acometer un experimento en el que el campo de corriente se creara, por medio de bombas externas, en generadores de remolinos.

El Centro de Investigaciones de Karlsruhe dispone de una experiencia muy valiosa en el estudio de corrientes de sodio líquido, adquirida tras muchos años de trabajo con reactores nucleares. Nuestro grupo comenzó allí, en 1992, la puesta en marcha de un experimento de estas características. Su parte central la constituye el módulo de dinamo, formado por 52 generadores de remolinos. Con la ayuda de codos de desvío conectados a los extremos de cada uno de ellos, se genera el campo de velocidades tal como fue diseñado por Busse. La corriente fluida que recorre, en circuito cerrado, el módulo la producen tres bombas magnetohidrodinámicas; dos de ellas impulsan las corrientes con remolinos mientras que la tercera se ocupa de la corriente axial. El dispositivo de dinamo empezó a funcionar en 1999.

Como ya se puso de manifiesto en los primeros experimentos, para valores de la corriente fluida de sodio de unos 120 metros cúbicos por hora en los canales de corriente de los generadores de remolinos, se generaba un campo magnético de amplio dominio espacial y cuyo valor promedio temporal permanecía estacionario. La intensidad de este campo centuplica la del campo magnético terrestre. Al igual que en el caso de éste, se produce una estructura de dipolo magnético, en la que la dirección del dipolo es perpendicular al eje del módulo de la dinamo.

El momento de comienzo del efecto dinamo y la dirección del campo magnético generado coinciden, en términos generales, con las predicciones teóricas que habían efectuado Andreas Tilgner, entonces en la Universidad de Bayreuth, y Karl Heinz Rädler, del Instituto Astrofísico de Potsdam. Con una elección adecuada de las condiciones iniciales experimentales se pudo también generar un campo magnético en la dirección opuesta. Tras un número considerable de intentos, en los que se bombearon distintos flujos de corrientes helicoidales y axiales en el circuito del aparato, logramos por fin construir un diagrama de estado para un dispositivo de dinamo de la instalación.

Los experimentos llevados a cabo en el Centro de Investigaciones de Karlsruhe han permitido concluir que las corrientes de remolino de un conductor cuasi-homogéneo generan de manera espontánea un campo magnético de larga duración. Dado el extremo parecido del dispositivo con la estructura de las corrientes que se cree hay en el núcleo de la Tierra, cabrá admitir que este experimento confirma el modelo actual, ya conocido, de geodinamo.

Sin embargo, antes de que los dos exitosos experimentos de Riga y Karlsruhe puedan aceptarse como una demostración cabal de la geodinamo, habrá que corregir dos deficiencias del esquema experimental. La primera es que la corriente del sodio fluido no es libre, sino que está confinada en estrechos conductos. Por culpa de ello, el campo magnético generado no puede, sino de un modo limitado, retroactuar por la fuerza electromagnética de Lorentz sobre la propia corriente fluida, modificándola en consecuencia. Por otro lado, en el experimento la corriente se provoca desde fuera; no se demuestra, pues, que ésta se origine interiormente por las fuerzas de arrastre.

La búsqueda de una mejor comprensión del retroacoplamiento magnetohidrodinámico del campo magnético generado sobre la propia corriente fluida ha promovido, en Europa y en América, numerosos proyectos experimentales sobre el

efecto dinamo. Se ha pensado en contenedores esféricos o cilíndricos, donde se generan remolinos espirales con ayuda de uno o dos rotores manejados desde el exterior. Las dimensiones del dispositivo se eligen cuidadosamente a fin de que puedan observarse, para intensidades de remolino por encima de cierto valor, la producción del efecto dinamo. En una corriente con remolinos libres en su interior, un campo magnético generado podría experimentar un efecto de retroalimentación natural que fuera mucho más intenso que en los canales de los experimentos de dinamo de Riga y Karlsruhe. No obstante, desde el punto de vista práctico resulta harto difícil generar un campo de velocidades libre en un fluido conductor que se parezca tanto a las condiciones que reinan en el interior de la Tierra como en el caso del experimento de Karlsruhe.

Muy prometedor se presenta el experimento proyectado por Daniel P. Lathrop, de la Universidad de Maryland en College Park, que parte de la idea de Carrington y Busse. Para conseguir la autogeneración del campo magnético, su grupo se propone modificar no sólo los materiales empleados, sino también las especificaciones y parámetros del experimento. En el espacio entre dos superficies esféricas concéntricas de titanio se coloca sodio como fluido de prueba. La esfera interior se enfría por su eje con un fluido frío; la exterior se calienta radialmente. Las dos cáscaras esféricas y el fluido que hay entre ellas se harán girar en rápida rotación de hasta cien vueltas por segundo. Bajo estas condiciones se producen en el sodio los ya descritos rodillos de convección.

Si este dispositivo experimental adquiere las condiciones necesarias —unas fuerzas térmicas ascensionales suficientes y una velocidad de rotación elevada—, se producirá la autogeneración de un campo magnético en un entorno muy similar al que concurre con las condiciones reales del interior de la Tierra. En los años venideros veremos si estas expectativas se confirman.

Bibliografía complementaria

A THREE-DIMENSIONAL SELF-CONSISTENT COMPUTER SIMULATION OF A GEOMAGNETIC FIELD REVERSAL. Gary A. Glatzmaier y Paul H. Roberts, en *Nature*, vol. 377, n.º 6546, págs. 203-209; 1995.

EXPERIMENTE ZUM DYNAMO-EFFEKT. Andreas Tilgner, Friederich Busse y Eike Grote, en *Sterne und Weltraum*, n.º 4; 2000.

FE DE ERRATAS

Muchos lectores habrán percibido en la pág. 20 del número de abril la errata en el título y la confusión entre tensión eficaz y máxima; la expresión “al pasar sus escobillas por los imanes” pretendía referirse a los barridos de las escobillas en presencia de imanes.

La fotografía de la pág. 83 del número de marzo es cortesía de J. A. L. Cooke/OSF/OKAPIA; la de la pág. 85, de Herbert Schwind/OKAPIA.

Leishmaniosis

Diagnóstico precoz

La leishmaniosis canina es una enfermedad producida por protozoos del género *Leishmania* que infectan fundamentalmente los macrófagos de humanos y perros.

Existen en el mundo unos 200 millones de personas expuestas a la infección. Cada año contraen la enfermedad entre dos y cuatro millones. Aunque en Europa sólo se manifiesta en raras ocasiones, la leishmaniosis humana ha cobrado especial importancia dada la asociación entre *Leishmania* y el virus de la inmunodeficiencia adquirida (sida). Ambos patógenos actúan de una forma sinérgica; uno potencia la virulencia del otro.

La situación en los animales es muy diferente. Sólo en Europa, la cantidad de perros en riesgo de infección por *Leishmania infantum* se cifra en 11 millones. La enfermedad se presenta de forma sistémica con resultado letal, si no se trata a tiempo. La prevalencia es alta en las zonas de España donde medra el vector, mosquito del género *Phlebotomus*. En nuestra patria, la incidencia oscila entre el 5 y el 15 % de la población total de perros. Teniendo en cuenta que aproximadamente el 50 % de los canes infectados no cursan la enfermedad, el número de perros infectados debe superar el 15 %. La presencia del parásito en el hospedador genera lesiones graves generalizadas por el desencadenamiento de reacciones inflamatorias e inmunosupresión.

Nuestro grupo ha investigado la producción de lesiones en el sistema nervioso central, que pueden ser la causa de los síntomas neurológicos descritos en personas con leishmaniosis.

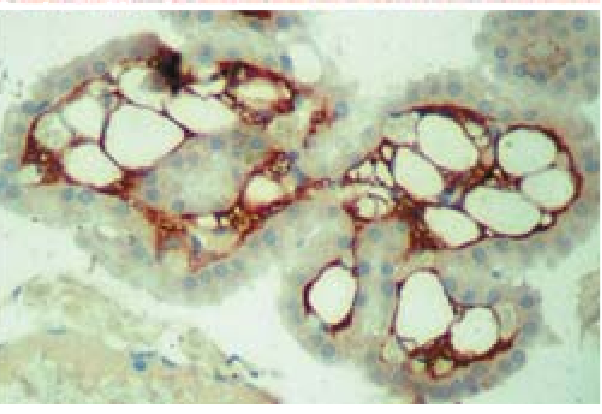
En la práctica, uno de los mayores problemas que presenta la infección y enfermedad causada por *Leishmania*, desde el punto de vista clínico, es la casi imposibilidad de realizar un diagnóstico apropiado antes de que se desarrollen los síntomas externos. Una vez manifestados éstos, la terapia es muy poco eficaz.

En teoría, la mejor forma de diagnosticar la infección por *Leishmania* consiste en descubrir la presencia del parásito en los tejidos del hospedador. Se ha utilizado también la "reacción en cadena de la ADN polimerasa (RCP)", de gran sensibilidad y especificidad. Sin embargo, esta técnica de detección requiere un laboratorio bien equipado. Se ha recurrido, además, a la inmunofluorescencia indirecta, la aglutinación directa y los métodos inmunoenzimáticos, técnicas todas ellas de gran sensibilidad y especificidad, que comparten una misma fuente de antígeno, las proteínas solubles del parásito.

Pero los valores de sensibilidad, especificidad y eficacia predictiva están condicionadas por la calidad del antígeno empleado. Además, estos sistemas de detección, aunque muy eficaces para diagnosticar infección, no son demostrativos de que el animal o persona estén realmente enfermos o vayan a desarrollar la enfermedad. Dicho de otro modo, al clínico le importa diagnosticar el comienzo temprano de la patología. De ahí el empeño puesto en la identificación de proteínas puras que tengan valor diagnóstico y reflejen el estado patológico.

Durante el período de progresión de la infección hacia la aparición de la enfermedad se forman unos complejos inmunitarios constituidos por la unión de determinadas proteínas del parásito a sus correspondientes anticuerpos que, al depositarse en los órganos, provocan inflamaciones y patologías. Cuando estos complejos destruyen las barreras de filtración se produce daño renal o del sistema nervioso, entre otros tejidos.

En nuestro laboratorio se han identificado y aislado varias proteínas antigénicas de *L. infantum*. Mencionaremos las proteínas ribosómicas Lip2a, Lip2b, Lip0, las histonas H2A y H3, proteínas de superfi-



Depósitos de la proteína Lip2b y Lip2a en un corte de hígado de un hámster (arriba) *y de plexos coroides de un perro* (abajo) *infectados con* Leishmania infantum

cie gp63 y gp46 así como la hsp70, hsp83, grp94 y Kmp-11. Con el fin de diagnosticar la presencia de inmunocomplejos, hemos diseñado y construido una proteína formada por la unión de varios fragmentos antigénicos de proteínas del parásito que desencadenan una respuesta inmunitaria en situaciones patológicas.

La "proteína Q", así la llamamos, se ha sintetizado a partir de las proteínas ribosómicas Lip2a, Lip2b, Lip0 y la histona H2A. Mediante técnicas de multiplicación ("amplificación") del ADN se obtuvieron las regiones génicas que cifran los determinantes antigénicos de cada proteína y posteriormente se unieron construyendo un gen artificial. Una vez sintetizado, el gen expresa en bacterias la proteína correspondiente.

Al contener cinco determinantes antigénicos, la proteína Q constituye un sistema serológico de detección de gran sensibilidad y especificidad. Se trata, pues, de una proteína artificial cuya novedad como sistema de diagnóstico radica en su riqueza en determinantes antigénicos, muy reactiva; además, algunos de sus componentes son los elementos que forman los inmunocomplejos.

Los resultados de tests serológicos con proteína Q en 115 perros con leishmaniosis visceral activa nos dieron una sensibilidad para dicha proteína del 96 % y para proteínas totales del 98 %. Estos datos indican que con el empleo de las proteínas totales, como antígeno, se consigue una ligera mayor sensibilidad que en el ensayo en el que se utiliza la proteína Q. Ensayos realizados por otros grupos con la proteína Q y proteínas totales, utilizando sueros de 289 perros de diversas razas y procedencias (126 diagnosticados parasitológicamente con leishmaniosis y 163 sanos o con otras patologías), pusieron de manifiesto que la proteína Q detectaba como positivos 123 de los 126, mientras que las proteínas totales revelaron como positivos 118 de los 126; de los 163 perros sanos, la proteína Q detectó como negativos 161 mientras que la proteína total señaló como negativos 151. Quedaba así patente la variabilidad que existe entre grupos de animales y la mayor especificidad conseguida en el diagnóstico al emplear la proteína Q como antígeno.

Para corroborar la validez diagnóstica se realizó un análisis de la reactividad de la proteína Q y las proteínas totales frente a sueros de animales (ratones, hámster y perro) infectados. Puesto que los ratones Balb/c no resisten de forma total la infección, aunque sí la controlan sin desarrollar la enfermedad, mientras que los hámsters no resisten ni la infección ni la enfermedad, se podría suponer que la proteína Q serviría para hacer un diagnóstico diferencial entre infección y enfermedad.

Los resultados obtenidos indicaron que la reactividad contra la proteína Q en los ratones es muy tardía y de muy baja intensidad cuando se comparaba con la alta reactividad contra las proteínas totales. En los hámsters la reactividad contra la proteína Q apareció algo más tarde que la reactividad contra las proteínas totales, pero alcanzaba, a las pocas semanas, niveles muy elevados, antes incluso de manifestar los primeros síntomas.

De lo anterior se desprendía que la reactividad contra la proteína Q sólo se presenta en los estados asociados a la enfermedad temprana. Inferencia que se confirmó por experimentos en los que una serie de hámsters y ratones fueron infectados con una cepa de *Leishmania* que no es infectiva. Se observó que los sueros de los hámsters y los de los ratones no reaccionaron con la proteína Q, mientras que lo hicieron de forma muy elevada contra proteínas totales. Como pronosticaba el diagnóstico con la proteína Q, estos animales no desarrollaron nunca la enfermedad. El mismo resultado se obtuvo en perros. La proteína Q detecta, pues, el estado patológico.

M. SOTO, J. M. REQUENA,
G. MACHADO,
M. GARCÍA-ALONSO,
L. C. NIETO, I. NAVARRETE
y C. ALONSO
Centro de Biología Molecular,
Madrid

Canales iónicos

La fosforilación de proteínas

Las funciones celulares están sujetas a mecanismos de regulación que permiten la adaptación de los organismos a las variaciones presentadas por los estímulos ambientales. Pensemos, por ejemplo, en factores químicos (hormonas), concentración de nutrientes (glucosa) o interacción entre las células de un tejido (comunicación nerviosa).

Esta regulación puede ocurrir en el curso de horas a días (largo plazo) o en el intervalo de segundos a minutos (corto plazo). En el primer caso, la expresión de proteínas específicas se regula principalmente mediante la activación o represión de los genes que las cifran. A corto plazo, la función de las proteínas se modula a través de modificaciones químicas subsiguientes a la traducción (es decir, una vez terminados la síntesis de la proteína y su procesamiento).

Las enzimas, proteínas con actividad catalítica, se someten a ambos niveles de regulación. La fosforilación de proteínas es un mecanismo de regulación post-traduccional que se presenta en todos los organismos y afecta a todas sus funciones. Las enzimas que controlan este proceso son las quinasas y fosfatasas, que añaden y eliminan, respectivamente, fosfatos de las proteínas (fosforilación y desfosforilación). De los residuos aminoacídicos de la proteína suelen fosforilarse las serinas, treoninas y tirosinas.

La modulación de los canales iónicos por fosforilación ha despertado el interés de los fisiólogos. Entre muchas otras funciones, dichas proteínas permiten la comunicación entre las neuronas y la contracción del corazón. ¿Cómo actúan los canales iónicos y cómo se regula su función?

Dado que la membrana celular está formada por una bicapa lipídica que excluye al agua, los iones (solutos salinos con carga eléctrica) no pueden atravesar esa barrera hidrófoba. Los canales iónicos son proteínas integrantes de la membrana celular que forman poros a

Ecosistemas peninsulares

Dunas de camarina

La costa atlántica de la península Ibérica, que se extiende desde Finisterre hasta el estrecho de Gibraltar, posee amplias formaciones de sistemas dunares. Una de las especies más características de estos sistemas es *Corema album* (camariña o camarina).

Endémica de la península, *C. album* pertenece a la familia de las Empetráceas, que abarca sólo tres géneros, si bien presenta una distribución biogeográfica extremadamente disyunta. El género *Corema* comprende dos especies, *C. conradii*, que habita en sistemas dunares sobre rocas ígneas de las montañas costeras del noreste de los Estados Unidos y sudeste de Canadá, y *C. album*, en la costa atlántica de la península Ibérica. Se ha descrito una subespecie en las islas Azores (*C. album* ssp *azoricum*); crece sobre cenizas volcánicas.



1. Las flores masculinas de Corema album *presentan tres estambres exertos de color rojizo*

Corema album es una especie dioica de matorral de aspecto ericoide. No suele superar el metro de altura, pero puede alcanzar varios metros de expansión lateral. Medra en sistemas dunares costeros, resistiendo cierta movilidad del sustrato gracias a su capacidad de crecimiento lateral por expansión de tallos horizontales más o menos subterráneos.

En cuanto planta dioica, hay individuos masculinos (flores masculinas en inflorescencias racimosas apretadas con tres estambres exertos de color rojizo) e individuos femeninos (flores femeninas agrupadas en el mismo tipo de inflorescencia, con pétalos de 1 mm y estigma trífido exerto). La planta femenina produce frutos carnosos, tipo baya, de color blanco o suavemente rosado, a modo de perlas grandes. Ocasionalmente, en la provincia de Huelva (Asperillo) y en el Algarve portugués (mata de Monte Gordo), se han encontrado individuos hermafroditas.

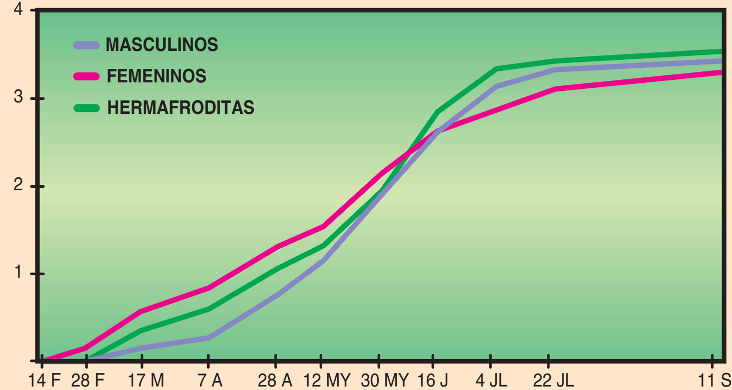
Los frutos de la camarina son consumidos por aves que habitan en estos sistemas dunares o los frecuentan, como la gaviota, el mirlo y otros paseriformes. También los comen conejos y zorros. Estos últimos consumen gran cantidad de bayas, a juzgar por las semillas de camarina que se encuentran en sus heces.

El hombre ha empleado las bayas de camariña con fines culinarios, para hacer mermeladas y licores, y con fines terapéuticos para preparados medicinales. Con ellas en la costa oeste de Portugal se confeccionaba un zumo fresco y suave para combatir la fiebre y las lombrices; todavía hoy se venden los frutos en algunas poblaciones entre Nazaré y Aveiro.

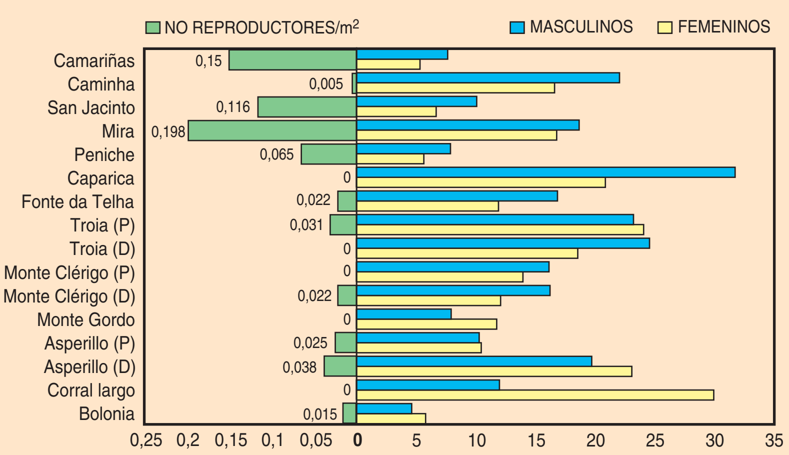
Los topónimos reflejan la abundancia, tiempo atrás, de esta especie en las zonas litorales. Por citar algunos ejemplos: el municipio de Camariñas en la Coruña, Pobla do Caramiñal en Pontevedra y Punta Camarinal en Bolonia (Cádiz).

Pero hoy *Corema album* se halla en regresión en muchas zonas y ha desaparecido de su hábitat natural en otras. En Galicia esta especie, antaño abundante, queda ahora confinada a dos poblaciones importantes, una situada en las islas Cíes y la otra en la ensenada del Trece en Camariñas. Tal retroceso se debe a la destrucción de los sistemas dunares costeros, fundamentalmente con fines urbanísticos y recreativos, y a las repoblaciones masivas con pinos, retama, acacia y uña de león, realizadas para fijar el sustrato dunar.

Nos planteamos abordar un estudio de la ecología de *Corema album* en toda su área de distribución, teniendo en cuenta las diferencias existentes entre individuos masculinos y femeninos. Nos movieron a ello varias razones. En primer lugar, el interés que representa esta especie como planta endémica y dioica de la península Ibérica. En segundo lugar, su distribución característica en un gradiente de aridez creciente desde el clima atlántico de Galicia hasta el clima mediterráneo del sur de la Península. En tercer lugar, los frutos de camarina, bayas carnosas, son consumidos por vertebrados asociados que actúan como vectores y garantizan su disper-



2. Elongación de ramas (centímetros) *en las tres formas sexuales* (pies masculinos, femeninos y hermafroditas) *en el Asperillo (Huelva) a lo largo de una estación de crecimiento*



3. Densidad de no reproductores (número de plantas/m²) a la izquierda y cobertura de ejemplares adultos masculinos y femeninos en porcentajes a la derecha. Los resultados corresponden a las distintas zonas de estudio

sión. En cuarto lugar, su hábitat peculiar en arenas móviles, sujeto a la influencia del aerosol salino, poca competencia con otras especies y su regresión constante en los últimos años ante la presión humana. Por último, el reto de poder establecer planes de gestión y regeneración de la especie en su área biogeográfica.

Como medida cuantitativa, para expresar la abundancia de la especie en las distintas localidades se utilizó la cobertura vegetal o superficie ocupada por la proyección de la planta sobre la superficie del suelo, pues la diferenciación de individuos resultaba a veces compleja. Como medida de regeneración de la especie empleamos la densidad de individuos no reproductores (número de individuos/superficie).

En Caminha y en el Corral Largo del Parque Nacional de Doñana la población está formada por individuos viejos, de gran cobertura con una morfología aérea en forma de tapiz, mientras que en San Jacinto y Camariñas encontramos ejemplares jóvenes de baja cobertura. No existían diferencias entre sexos. La regeneración natural de la especie varía bastante; en la zona de Mira existe un gran número de plántulas e individuos de todas las edades, mientras que en la zona de Caminha o Vila Real de Santo Antonio la población está formada por ejemplares viejos. En el Asperillo hemos observado que la germinación natural ocurre preferentemente en semillas que han pasado por el tracto digestivo de animales.

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos establecer tres modelos de poblaciones de *Corema album* a lo largo de su área de distribución. Conforman el primero poblaciones sobre ecosistemas dunares, situadas detrás del primer cordón dunar, que pueden mantenerse en estadios sucesionales más avanzados. Es el caso de Asperillo, Mira, S. Jacinto o Troia. En el segundo modelo se incluyen las poblaciones en arenas sobre acantilados, donde la intensidad del viento puede ser el factor ecológico principal; se forman tapices de camarina que no superan los 30 cm de altura. En esta situación se encuentran Peniche, Monte Clérigo.

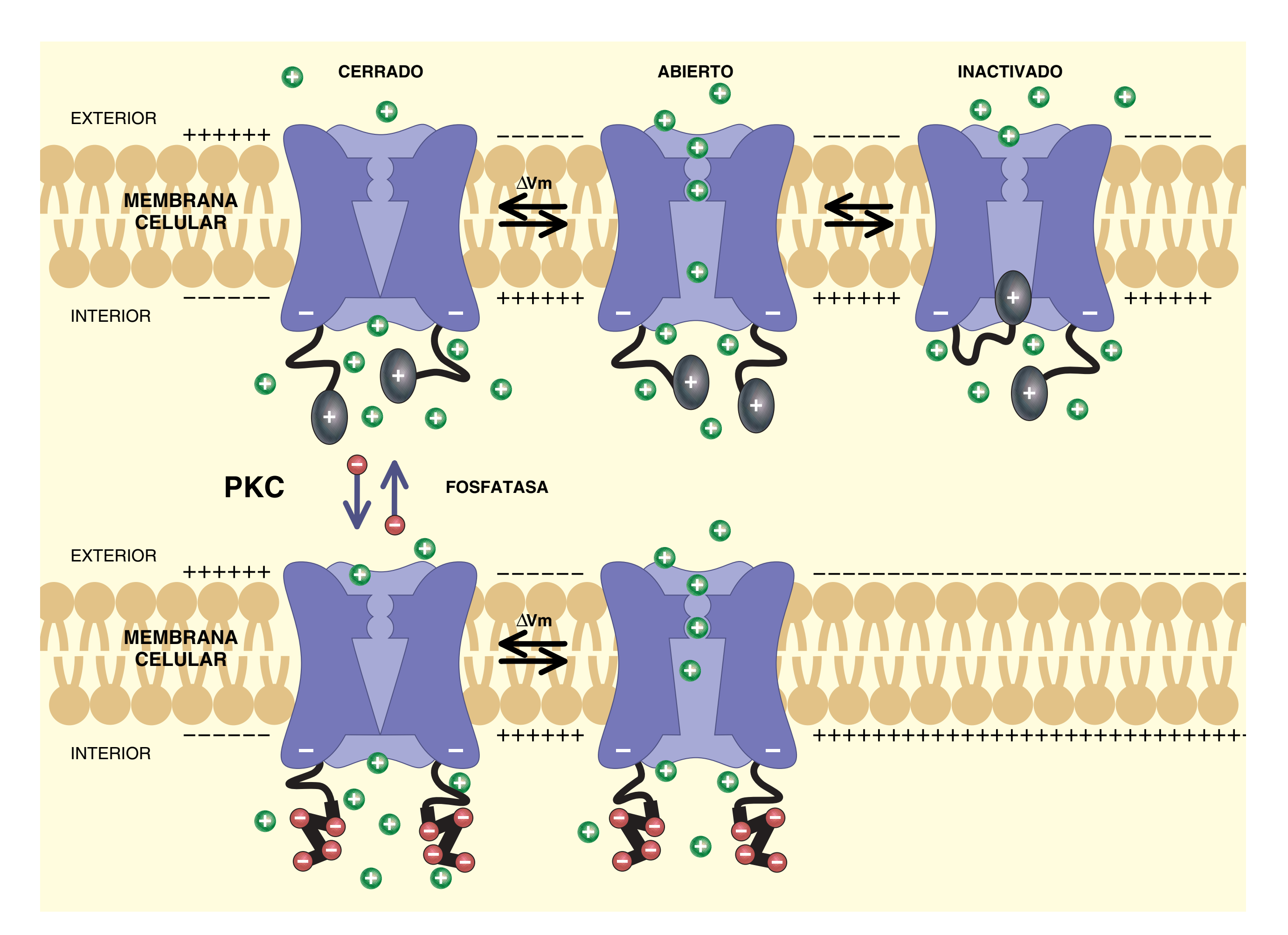
4. Los individuos femeninos producen frutos carnosos de color blanco o rosado. Esas bayas entran en la dieta de gaviotas, conejos o zorros, entre otros animales

El tercer modelo describe poblaciones afectadas por repoblaciones o presión humana. A lo largo de toda su área de distribución, se puede observar que la camarina resiste muy mal la sombra y la competencia con otras especies de crecimiento más rápido como el pino, la acacia o la uña de león. Los ejemplares aparecen ahogados, recluidos a huecos con una morfología muy abierta y bajo índice de área foliar. Se dan en Bolonia, Monte Gordo y Caminha.

El patrón de crecimiento vegetativo reveló una diferenciación temporal entre sexos, aunque la elongación de las ramas al final de la estación de crecimiento en el año sea la misma. Al inicio de la estación de crecimiento (febrero-marzo), que coincide con la floración masculina y la producción de polen, los pies femeninos presentan un incremento vegetativo mayor que los masculinos, situación que se invierte cuando se inicia el desarrollo del fruto (junio). Los individuos hermafroditas presentan un patrón intermedio. La planta tiene que optar entre invertir los recursos adquiridos hacia la reproducción o hacia el crecimiento vegetativo en razón de las necesidades.

Hemos podido comprobar que la germinación de *Corema* es difícil en condiciones experimentales. En la naturaleza parece estar asociada a algún vector animal, lo que explicaría la ausencia de germinación natural en zonas más perturbadas.

MARI CRUZ DÍAZ BARRADAS, ALICIA CLAVIJO, MARÍA ZUNZUNEGUI, FÁTIMA AIN-LHOUT y FRANCISCO GARCÍA NOVO
Universidad de Sevilla
OTILIA CORREIA
Universidad de Lisboa, Portugal



Modulación de la compuerta inactivadora de un canal de potasio por fosforilación. En reposo, el canal de potasio se encuentra cerrado. La despolarización de la membrana celular (ΔVm) induce la apertura del canal y permite la salida del potasio siguiendo el gradiente electroquímico. Se interrumpe luego el flujo cuando la compuerta inactivadora ocluye el poro del canal. En esta secuencia se invierten 25 milisegundos. Cuando el canal se fosforila por la proteína quinasa C (las bolas rojas representan iones de fosfato con carga negativa), la compuerta inactivadora adopta una conformación relajada y pierde la capacidad de ocluir el poro. Consecuentemente, el flujo de potasio se prolonga hasta que una fosfatasa desfosforila el canal. La fosforilación de una población de canales de potasio puede tardar desde segundos hasta minutos

través de los cuales se transportan los iones a una alta velocidad (~10.000.000 iones por segundo).

Por tanto, los canales iónicos son enzimas especializadas que favorecen el transporte pasivo de iones a través de la membrana celular, esto es, siguiendo un gradiente electroquímico. La actividad catalítica de canales iónicos específicos puede ser altamente selectiva para ciertos iones (sodio, potasio, calcio, cloruro, etc.) y es probablemente la más rápida de la naturaleza. Transmisores químicos, cambios en el voltaje de la membrana celular o agentes mensajeros intracelulares son algunos de los factores que controlan la apertura y el cierre de los canales iónicos.

La función de los canales iónicos es esencial para el balance electrolítico, la comunicación entre las neuronas y la función muscular. A las mutaciones experimentadas en ciertos canales iónicos se atribuye un número creciente de enfermedades hereditarias que afectan al cerebro (epilepsia y sordera), el corazón (arritmias) y el músculo esquelético (parálisis).

Hoy en día, se acepta que la fosforilación de los canales iónicos determina la plasticidad del sistema nervioso. Gracias a la investigación del mecanismo en cuya virtud las quinasas y fosfatasas regulan los canales iónicos conocemos mejor las bases moleculares del aprendizaje y la memoria. En respuesta a un estímulo, se liberan neurotransmisores que actúan sobre receptores específicos en otras neuronas; ese proceso desencadena una cascada de reacciones que conducen a la fosforilación de ciertos canales iónicos. Al modificarse entonces su función, se afecta la actividad eléctrica de las neuronas (alterando la amplitud, la duración o la frecuencia del impulso nervioso). ¿Por qué se modifica la función de los canales iónicos con la adición de fosfatos?

La fosforilación modula directamente canales iónicos de muy diverso tipo incluyendo aquellos que dependen de la diferencia de potencial en la membrana. Si bien el voltaje de membrana controla la

apertura y cierre del canal, la fosforilación puede modular la probabilidad de que estos canales permanezcan en el estado cerrado, abierto o inactivado.

En un trabajo reciente de nuestro laboratorio descubrimos que la compuerta inactivadora del canal de potasio pierde la capacidad de ocluir el poro cuando la proteína quinasa dependiente de calcio (PKC) lo fosforila y, en consecuencia, se prolonga la apertura hasta que una fosfatasa torna a desfosforilar el canal. En colaboración con el grupo de Bernd Fakler, de la Universidad de Tübingen, descubrimos también que un cambio estructural inducido por la fosforilación cancela la función de la compuerta inactivadora. Dicha modificación podría, pues, asemejarse a un interruptor molecular que al encenderse o apagarse altera la capacidad del canal de potasio para controlar la duración del impulso nervioso.

Puesto que a los canales de potasio les compete reducir la excitabilidad de las neuronas, hemos postulado que, cuando el canal se inactiva rápidamente (compuerta inactivadora desfosforilada), se prolonga el impulso nervioso. Por contra, cuando el canal no se inactiva o se inactiva lentamente (compuerta inactivadora fosforilada), el impulso nervioso se acorta. En el primer caso, se intensificaría la comunicación neuronal, y en el segundo, se debilitaría. Así, el balance dinámico molecular entre quinasas y fosfatasas podría contribuir a la plasticidad del sistema nervioso.

MANUEL COVARRUBIAS
y MARÍA T. PACHECO CANO
Depto. de Patología, Anatomía
y Biología Celular
Facultad Jefferson de Medicina,
Filadelfia

Gramática del XVII

Caramuel

Juan Caramuel Lobkowitz nació en Madrid en 1606 y murió en 1682 en Vigevano (Lombardía). Menéndez Pelayo dice de él que era "el más erudito y fecundo de los polígrafos del siglo XVII".



Caramuel a los 46 años de edad

En lingüística, Caramuel exploró dos campos característicos: la gramática general o especulativa y el proyecto de una nueva lengua. En el primer caso, se anticipó a la gramática de Port-Royal. En el segundo, a Wilkins, Dalgarno y al mismo Leibniz. Caramuel era consciente de que la lengua había de ser el camino adecuado para la comprensión del ser. La gramática debía cumplir el papel de ser una vía de acceso al conocimiento: Se pretendía conocer el ser (metafísica), a través de una serie de conceptos (lógica) y ese conocimiento se construía y se expresaba a través del lenguaje (gramática). Había que encontrar la forma de verter el pensamiento en la estructura lingüística ideal. En la *Gramática audaz* analiza las diversas estructuras de la lengua y, en especial, el fenómeno de la elipsis con el fin de establecer que existen formas contingentes en las lenguas particulares de las que se puede prescindir porque las que realmente importan son aquellas que se corresponden con la estructura mental y lógica.

El otro ámbito de estudio, sobre todo en el *Leptotatos*, aunque ya anticipaba en la *Gramática audaz* las nuevas formas verbales, es la creación de una nueva lengua que remediase las deficiencias de las lenguas existentes.

Los síntomas de la enfermedad de la lengua pueden advertirse en relación a la polisemia del verbo ser: en primer lugar, el verbo ser no es capaz de distinguir entre la esencia y la existencia actual. En segundo lugar, el verbo ser no es capaz de captar las diferencias temporales pensadas y necesarias en el contexto medieval cristiano: la duración temporal, la duración eviterna y la eterna. En tercer lugar, se necesita una forma lingüística que exprese de manera específica el modo de existir de Dios, diferenciándola de la existencia de las criaturas. En cuarto lugar, se requiere una forma del verbo ser que diferencie el ser físico del lógico y del metafísico. Y, por último, el verbo sustantivo no tiene formas que permitan significar un tiempo indeterminado, ajeno al presente, al pasado y al futuro. La terapia consiste en la construcción de nuevas formas verbales (*recuadro*).

LORENZO VELÁZQUEZ CAMPO
Dpto. de Filosofía
Universidad de Valladolid

Significado de formas verbales y tipo de vocal que se utiliza:

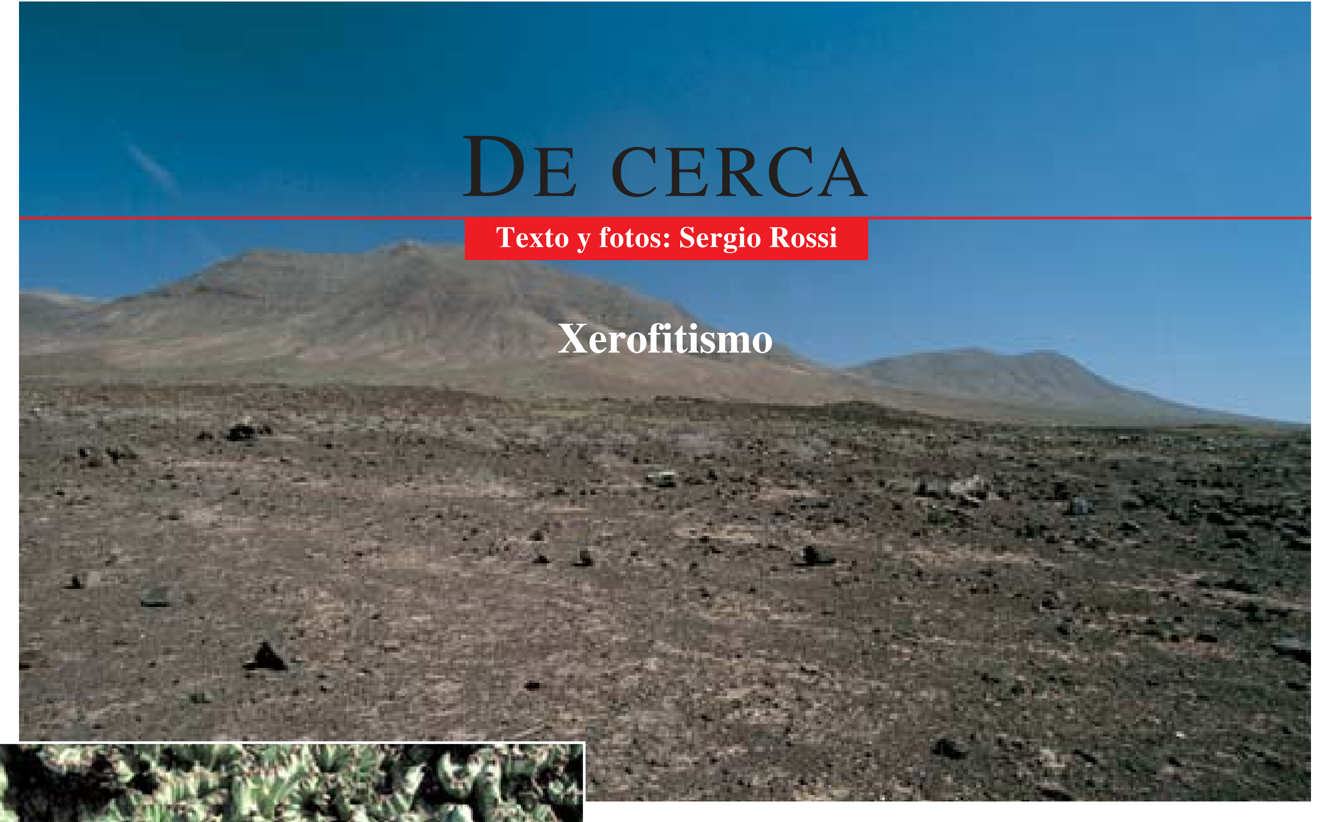
- Con la a (*Sam, sas, sat*), se señala sólo la esencia.
- Con la e (*Sem, ses, set*), se expresa la existencia.
- Con la y (*Sym, sys, syt*), se indica la consideración eterna, referida sólo a Dios.
- Con la o (*Som, sos, sot*), expresa la sempiternidad, abarcando el presente, el pasado y el futuro.
- Con la u (*Sum, sus, sut*), se expresa el tiempo indeterminado.

A partir de aquí, derivaba los participios: perfectos (*Sans, santis; Sens, sentis*...), pluscuamperfectos (*Saans, saantis; Seens, seentis*...), e imperfectos (*Sains, saintis; Seins, seintis*...), los correspondientes infinitivos (*Sare, Sere*...; *Saare, Seere*...; *Saire, Seire*...) y las formas transitivas que rigen acusativo (*Samo, Semo*...).

De cerca

Texto y fotos: Sergio Rossi

Xerofitismo



1. Paisaje desértico en la isla de Lanzarote

2. Planta crasa de tipo reptante. En muchos casos, la reproducción asexual es un modo de propagación común entre las plantas xerófitas

En un ambiente desértico o en el que el agua escasea, las plantas adoptan distintas estrategias para sobrevivir. Durante las épocas de sequía asfixiante, los vegetales se refugian en un letargo parcial o total. Las respuestas ante las adversidades hídricas ofrecen un amplio repertorio, lo que origina, en determinadas zonas, una diversidad biológica considerable.

Según el modo como resuelven los problemas de la sequía, las plantas xerófitas se dividen en dos grupos: las que la evaden y sobreviven en forma de semillas listas para germinar en las primeras lluvias, y completar prestamente el ciclo biológico, y las que hacen frente a las condiciones de sequía mediante mecanismos para almacenar agua, buscar humedad bajo tierra o de los rocíos de primera hora de la mañana, crear gruesas capas que impidan la excesiva transpiración, reducir el número de estomas y modificarlos, crear tricomas ("pelos") capaces de reflejar la luz del sol o transformar hojas en espinas que las defiendan de los herbívoros.

Un cactus gigante, pensemos en el saguaro, puede medir 15 metros de altura, con otros tantos de radio en forma de raíces. Después de una lluvia torrencial, las raíces (que están casi a flor de tierra) absorben el agua con gran eficacia y bombean literalmente centenares de litros hacia el tallo. La cactácea típica tiene espinas y pliegues flexibles, a modo de acordeón, en su tallo carnoso para que éste se expanda rápidamente cuando acumula agua y se contraiga lentamente al irla consumiendo en la estación seca. En las cactáceas la fotosíntesis se realiza en el tallo. Mantener expuestas las hojas supondría dejar al sol demasiada superficie, que provocaría una excesiva transpiración (y por tanto pérdida de agua).

Con todo, la falta de lluvia no es el único motivo de adaptación del vegetal a las condiciones de escasa humedad. Si añadimos un entorno frecuentemente batido por las olas, las plantas deberán luchar también contra la excesiva salinidad acarreada por microgotas marinas que las salpicarán una y otra vez. En esa situación, el exterior de hojas, tallo o raíces puede acumular sal, que, por ósmosis, provocará una pérdida hídrica importante.

En todos los casos, esos organismos fotosintetizadores, constituidos por mecanismos de adaptación en xerófitos (y a veces también en halófitos), colonizan un espacio restringido para ellos. Los múltiples requerimientos necesarios para poder sobrevivir en condiciones tan extremas impedirán que ninguna otra planta se los dispute.



3. "Viejito del Perú" (Espostoa *sp.*)*, cactácea que ha desarrollado un sistema para retener el agua del rocío de forma eficiente a través de una "barba" que crece asimétrica*



4. Muchas flores e inflorescencias aparecen tras las fuertes lluvias; sin embargo, otras de desarrollo más pausado (como el de este cactus Austrocephalocereus albicephalus*) poseen estructuras adaptadas a la carencia de agua*



5. Además del sol, un ambiente cargado de salinidad puede ser causa de adaptaciones xerófitas, como es el caso de plantas que viven cerca del mar



6. Muchos líquenes son especialistas en adaptaciones a condiciones extremas de escasez de agua; éstos viven en una zona volcánica y desértica

La biodiversidad brasileña, amenazada

Brasil se encuentra entre los cinco países con mayor número de especies de plantas, aves y mamíferos en peligro de extinción

Marcelo Tabarelli, Joelma de Fátima Marins y José Maria Cardoso da Silva

Brasil es el país de la megadiversidad. A lo largo de sus casi 8.600.000 km^2 de extensión, lo que equivale unas 17 veces el territorio español, medran 55.000 especies de plantas con flores, 1622 de aves, 518 de anfibios, 467 de reptiles y 457 de mamíferos. Muchas de ellas son endémicas y exclusivas de esa nación.

Tamaña diversidad biológica se explica en parte por la gran heterogeneidad ambiental de que goza, lo que posibilita la existencia de un número elevado de tipos de vegetación distintos. Podemos reducir a dos grupos los principales biomas brasileños: forestales y no forestales. Los biomas forestales son la Amazonía y la Selva Atlántica. Pertenecen al grupo de los no forestales la Caatinga, el Cerrado, el Pantanal y los Campos Sulinos. Por su parte, la Caatinga, el Cerrado y el Pantanal integran un "corredor de formaciones abiertas" que, extendiéndose en sentido nordeste-sudoeste, separa la Amazonía de la Selva Atlántica.

Igual que en otras partes del planeta, el desarrollo de las actividades humanas en Brasil durante los últimos 500 años ha causado un notable impacto negativo sobre su biodiversidad. Grandes extensiones naturales se transformaron en tierras de labor, ciudades y complejos industriales. Puesto que la colonización europea se inició por la costa Atlántica, el primer bioma importante en destruirse fue la Selva Atlántica. Hoy no llega al 7 % de este ecosistema la zona que se halla cubierta por bosque.

La Caatinga y el Cerrado han sufrido también bastante alteración. Se cifra en torno al 60 % la fracción de la Caatinga modificada por el hombre. Desde el decenio de los cincuenta, con la construcción de la nueva capital federal en la región central de Brasil y de un sistema formidable de carreteras, la frontera económica se transfirió al Cerrado. Desde entonces, se han instalado en la región poderosas empresas agropecuarias, alterando cerca del 80 % de su vegetación original. Las dos últimas fronteras son el Pantanal y la Amazonía, ambas en proceso acelerado de degradación.

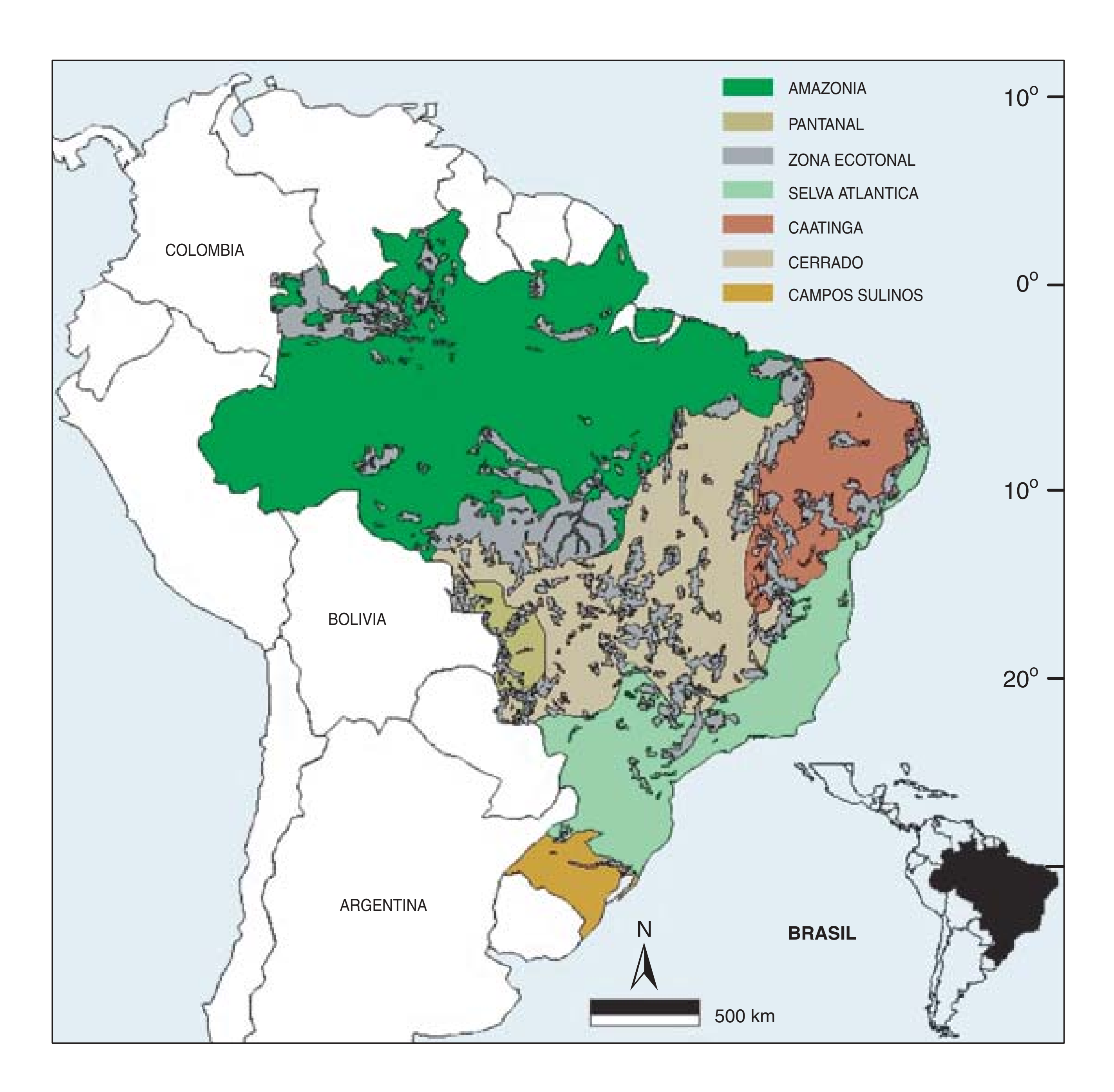
La destrucción de grandes zonas naturales genera, invariablemente, extinciones de especies. El proceso de extinción constituye una función dependiente de la escala espacial. Puede ser local (erradicación), cuando la especie desaparece en sólo parte de su distribución geográfica original, o global, si la especie se borra totalmente del planeta.

Para identificar episodios de extinción que ocurren en nuestros días, es necesario disponer de dos tipos de información, por lo menos: la identificación correcta de la especie y el reconocimiento de su distribución original. Por desgracia, carecemos de información sobre la distribución geográfica de la mayoría de las especies tropicales. Cada año se recuperan para la ciencia un promedio de 2350 nuevas especies de plantas con flores (Angiospermas), muchas de ellas confinadas en biomas muy alterados, como la Selva Atlántica y el Cerrado. Por eso, podemos afirmar con seguridad que muchas especies, sin clasificar todavía, se hallan en proceso de extinción. Las listas de especies *oficialmente* amenazadas de extinción, elaboradas por expertos y siguiendo criterios metodológicos bien definidos, constituyen un instrumento poderoso mediante el cual la sociedad puede comprender la magnitud del proceso de pérdida de especies y así elaborar estrategias para detenerlo.

Este artículo se centra en las especies de árboles y arbustos amenazados de extinción en Brasil. A través del análisis de un conjunto de listas de especies amenazadas elaboradas en los últimos decenios abordaremos las cuestiones siguientes: número de especies amenazadas, su distribución geográfica, amenazas principales, característi-

Los autores

MARCELO TABARELLI, JOELMA DE FATIMA MARINS y JOSE M.ª CARDOSO DA SILVA son ecólogos que trabajan en diferentes campos de la biodiversidad brasileña. Tabarelli, docente de ecología vegetal en la Universidad Federal de Pernambuco, investiga en plantas leñosas. Marins, alumna suya, centra su interés en la distribución de especies vegetales. Cardoso da Silva dirige el plan conservacionista de la Amazonía de la Conservation International de Brasil.



1. BRASIL es un país de dimensiones continentales cubierto por dos grandes grupos de biomas: forestales (Amazonía y la Selva Atlántica) y no forestales (Caatinga, Cerrado, Pantanal y los Campos Sulinos).

cas biológicas de esas especies y medidas para invertir el proceso de extinción.

Número de especies amenazadas de extinción

Un total de 1599 especies de la flora brasileña de plantas vasculares con semillas está *oficialmente* amenazada de extinción. Estas especies aparecieron alguna vez en los siguientes elencos: *Centuria Plantarum Brasiliensium Exstintionis Minitata*, publicada en 1992 por la Sociedad Botánica de Brasil, que lista 100 especies; *Libro rojo de las plantas amenazadas*, de 1997, dado a la imprenta por la IUCN (The World Conservation Union) en 1998, donde se elencan 1358 especies que medran en Brasil; y el *Libro rojo de las especies amenazadas*, del año 2000, editado por la IUCN y donde aparecen 460 especies brasileñas.

De las plantas vasculares amenazadas de extinción en Brasil, 1130 especies (70,6 %) son árboles y arbustos que se distribuyen en sólo 80 de las más de 250 familias de plantas vasculares registradas. La distribución de las especies entre esas 80 familias no es homogénea. De hecho, cerca del 50 % de las especies listadas pertenecen a seis familias: Leguminosae (*sensu lato*), Sapotaceae, Chrysobalanaceae, Myrtaceae, Lecythidaceae y Lauraceae. No existe, pues, ninguna duda de que los catálogos es-

tán limitados por el conocimiento de los especialistas, que parecen haberse ceñido a determinados grupos taxonómicos.

Distribución geográfica de las especies amenazadas

Todos los principales biomas brasileños poseen especies de árboles y arbustos amenazados de extinción. Algunas especies tienen una distribución geográfica restringida, mientras que otras muestran una muy amplia. Ciñéndonos a las especies cuya distribución es razonablemente conocida (635 especies), las que están confinadas en la Selva Atlántica y en la Amazonía representan más del 80 % de las especies amenazadas. Las especies restringidas a las formaciones abiertas constituyen menos del 10 % de los árboles y arbustos en peligro.

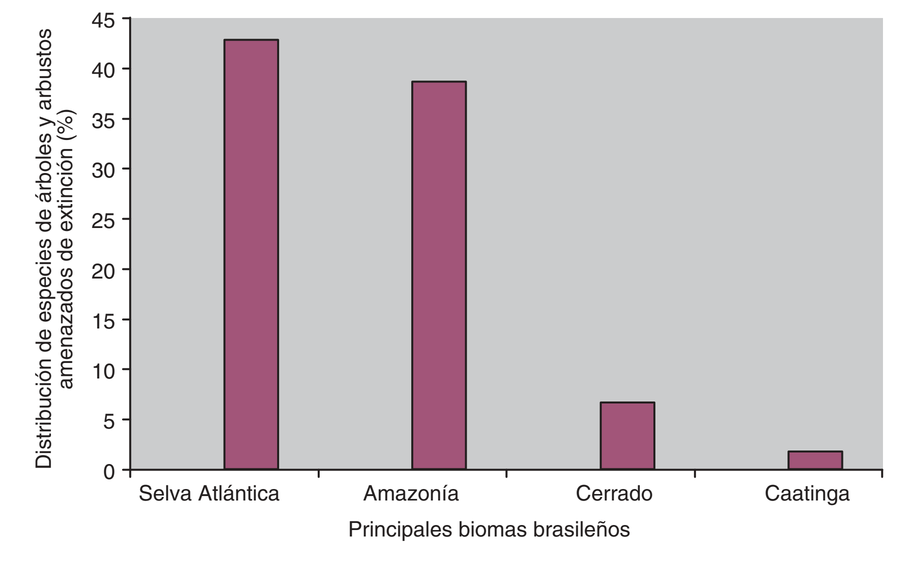
La Selva Atlántica sobresale por encima de otros biomas. Contribuye con más del 40 % de las especies de árboles y arbustos amenazados de extinción. Estar amenazada de extinción parece haber sido la norma entre las plantas de la Selva Atlántica en los últimos 500 años. El primer caso documentado de una especie de árbol brasileño amenazado, el palo brasil (*Caesalpinia echinata*, Caesalpiniaceae), es un endemismo de la Selva Atlántica. El palo brasil dio origen al nombre del país. Fue, además el primer producto de exportación entre los siglos XVI y XVIII. Del palo brasil se extraía un colorante rojo, apreciado en la tinción de tejidos y en la escritura. El declive de la especie se hizo patente en menos de 250 años de explotación. En carta de 30 de agosto de 1775, el marqués de Pombal exigía que Brasil remitiese a Portugal "*palo brasil de calidad en troncos gruesos como antiguamente llegaba*". Antaño con amplia distribución en la Selva Atlántica, el palo brasil persiste ahora en escasos puntos de los bosques de la costa brasileña.

Entre las ocho especies consideradas extintas, seis medran en la Selva Atlántica y dos en el Cerrado. Ambas regiones han sido recientemente consideradas por Conservation International núcleos importantes de biodiversidad, es decir, regiones naturales con biotas muy diversas y un número elevado de endemismos que se hallan seriamente amenazados por la actividad humana. En el capítulo de las especies reputadas extintas, algunas son conocidas sólo por el espécimen que sirvió de base para su descripción. Recordemos los casos de *Simaba floribunda* A. St. Hil. y *S. suaveolens* A. St. Hil., de la familia Simaroubaceae, conocidas sólo por los ejemplares recogidos por el naturalista francés Auguste Saint-Hilaire, en su viaje a Minas Gerais en 1823.

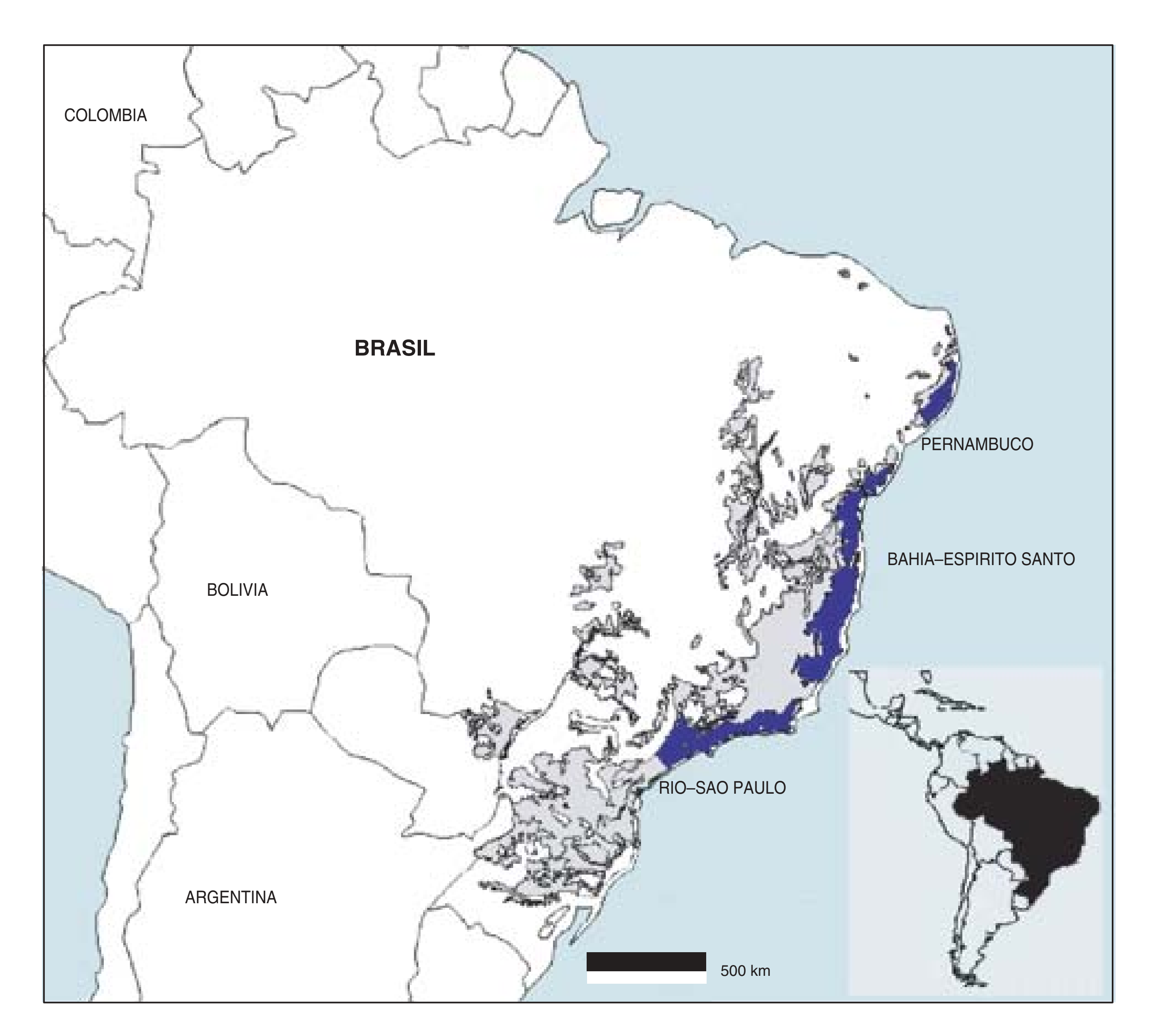
Principales amenazas

La pérdida de hábitat, la explotación maderera y de otros productos forestales, como sustancias químicas (safrol, pilocarpina, linalol) y palmito, son, en conjunto o de forma aislada, los factores que oficialmente ponen a las especies en peligro de extinción en los biomas brasileños más alterados por el hombre: Selva Atlántica, Cerrado y Caatinga. Muchas especies son raras en la naturaleza, es decir, presentan poblaciones pequeñas y distribuidas en áreas restringidas. En estos casos, la pérdida de hábitat, causada por la acción antrópica, incrementa el riesgo de extinción. Se incluyen en este grupo 21 especies con distribución geográfica limitada a los estados de Río de Janeiro y Bahía, dos regiones identificadas por diversos botánicos como importantes centros de endemismos de plantas leñosas en la Selva Atlántica. Un buen ejemplo es el oiti-boi (*Couepia schottii*, Chrysobalanaceae), árbol de los matorrales de bajíos del sudeste de Brasil. La pérdida de hábitat no sólo amenaza a las especies naturalmente raras, sino también a las que alcanzan una amplia distribución geográfica; así, el marmeliño (*Brosimum glazioui*, Moraceae), árbol antaño distribuido en la Selva Atlántica del sur y sudeste de Brasil y hoy en peligro de extinción.

En los bosques tropicales ricos en especies y endemismos, la pérdida de hábitat y la explotación de productos forestales representan una amenaza grave. La Selva Atlántica brasileña posee unas 18.000 especies de plantas vasculares, de ellas 8000 endémicas. Semejante riqueza se reparte en tres centros de endemismos a lo largo de los 25 grados de latitud en la costa brasileña. En algunos de estos centros, como el de Pernambuco —que engloba todos los bosques al norte del río São Francisco—, ha desaparecido más del 98 % del bosque. Los 3197 km^2 de bosque



2. LOS PRINCIPALES BIOMAS brasileños poseen especies de plantas vasculares amenazadas de extinción. En la Amazonía y la Selva Atlántica se encuentra la mayor parte de las especies de árboles y arbustos en peligro de desaparición.



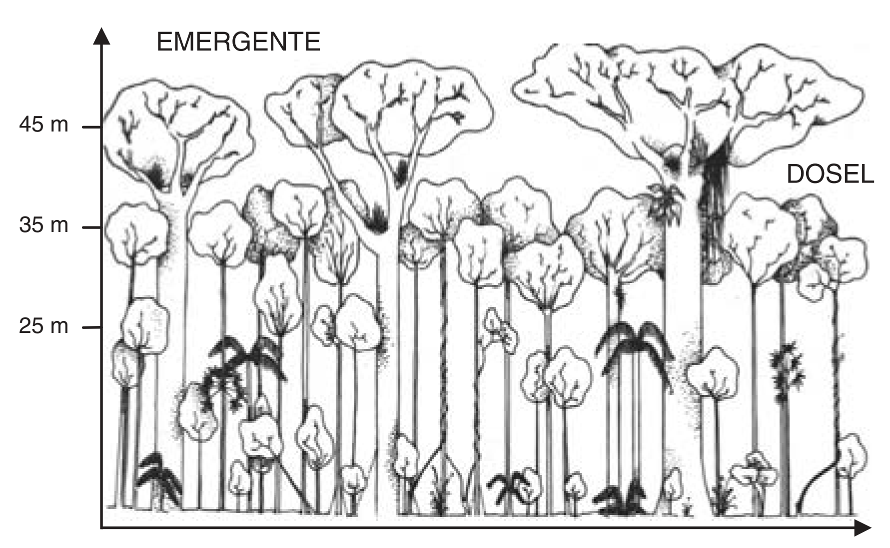
3. LA SELVA ATLANTICA BRASILEÑA se distribuye a lo largo de 25 grados de latitud. Cubría antaño 1.107.236 km^2 del territorio nacional. De acuerdo con los registros de distribución de las plantas vasculares, sus bosques albergan por lo menos tres centros de endemismos de este grupo biológico: Pernambuco, Bahía-Espírito Santo y Río de Janeiro-São Paulo.

restantes abrigan, por lo menos, 1000 especies de plantas vasculares, incluida la sapotácea amenazada *Manilkara dardanoi*, árbol endémico de este centro de endemismo y que hoy se encuentra en menos de una docena de parcelas de bosque de la región.

En la Amazonía, el bioma brasileño menos alterado por el hombre, la rareza natural (distribución geográfica restringida) parece ser la norma entre las especies de árboles y arbustos incluidos en las listas rojas. Entre las especies oficialmente amenazadas y exclusivas de este bioma, sólo nueve presentan un valor maderero reconocido. Son innumerables las especies de las familias Lecythidaceae, Chrysobalanaceae y Sapotaceae con distribución geográfica restringida, que viven en ambientes particulares. Un ejemplo es la sapotácea *Manilkara excelsa*; se trata de una especie rara que se halla confinada en los bosques anegados de un tributario del río Amazonas. Las especies de las familias mencionadas representan más del 60 % de la flora oficialmente amenazada de la Amazonía; se cuentan, sin duda, entre los grupos taxonómicos más diversificados y bien conocidos de la región.

Características biológicas

Las especies de árboles representan el 53 % de las 1599 especies de plantas vasculares oficialmente amenazadas en Brasil y el 76 % del grupo compuesto por 1130 especies que incluye árboles y arbustos. Las 859 especies de árboles están clasificadas como raras/bajo riesgo (15 %), vulnerables (22,7 %), en peligro de extinción (21,5 %) y extinguidas (0,58 %). Las especies de árboles de la Selva



4. LOS ARBOLES DEL DOSEL Y DEL ESTRATO EMERGENTE de la Selva Atlántica y de la Selva Amazónica constituyen un importante grupo de especies potencial y oficialmente amenazadas de extinción.

Atlántica (algunas de las cuales se dan también en la Caatinga y en el Cerrado) cuya población declina diezmada por la reducción del hábitat representan la mayoría de las amenazadas en estos ecosistemas.

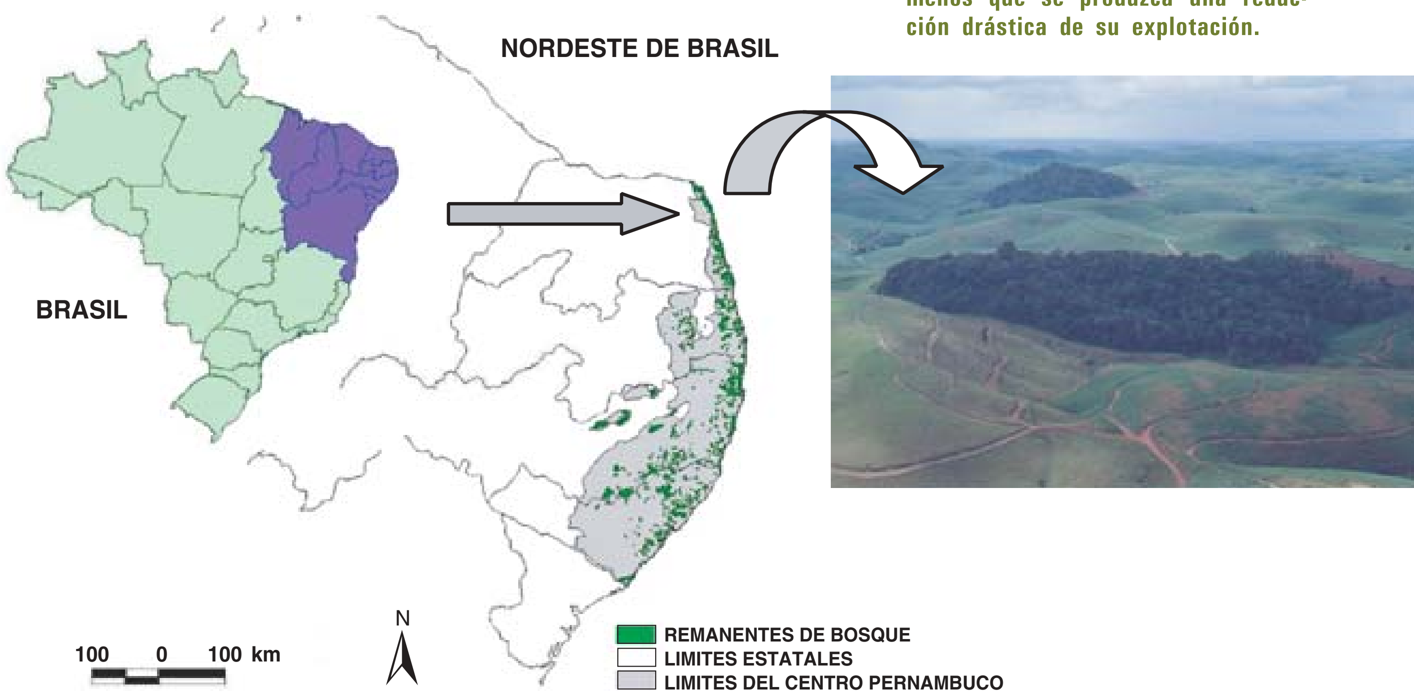
Importa subrayar que muchas de las especies hoy amenazadas por la pérdida de hábitat corresponden a poblaciones diezmadas durante cinco siglos de explotación comercial de la madera. Encuádrase en este grupo la *Araucaria angustifolia,* de la familia Araucariaceae. Se trata de un árbol que emerge majestuoso y alcanza 50 m de altura. Sufrió una intensiva explotación. En su libro *Los bosques de América del Sur*, K. Hueck comenta que, sólo en 1963, se taló un total de 1.121.000 m^3 de madera de esa araucaria para la exportación. Hoy el bosque dominado por dicha especie se ha reducido a un 13 % de su área original.

Además de *Araucaria angustifolia*, el principal grupo de maderas nobles explotadas históricamente en la Selva Atlántica son árboles del dosel y del estrato emergente: cedro (*Cedrela fissilis*), jacarandás (*Dalbergia*, *Machaerium*), perobas (*Aspidosperma*), ipés (*Tabebuia*), canelas (*Ocotea*, *Nectandra*), copaíbas (*Copaifera*), jequetibás (*Cariniana*), jatobás (*Hymenaea*), mazarandubas (*Manilkara*), sapucayas (*Lecythis*), laureles (*Cordia*, *Ocotea*, *Nectandra*), sucupiras (*Bowdichia*, *Diplotropis*), ucuúbas (*Virola*) y el propio palo brasil.

La explotación de la madera de estas especies sirvió de base para la economía del Brasil colonial, siendo responsable de gran parte del mobiliario europeo durante los siglos XVI, XVII y XVIII. A pesar de estar prohibida la explotación comercial de madera en la Selva Atlántica, la tala selectiva de maderas nobles para "subsistencia" continúa siendo una práctica común.

Todavía persisten especies amazónicas *oficialmente* amenazadas como consecuencia de la acción combinada de extracción maderera y pérdida de hábitat. En un estudio realizado por A. Martini, N. A. Rosa y C. Uhl sobre 305 especies de árboles con valor maderero ama-

5. EN CIERTAS REGIONES, así en el centro de Pernambuco, la Selva Atlántica remanente consta de millares de fragmentos forestales donde la probabilidad de declive y extinción local de las poblaciones es elevada, a menos que se produzca una reducción drástica de su explotación.



zónicos del dosel y del estrato emergente se identificó un grupo de 41 especies potencialmente amenazadas por la explotación. Especies como la cesalpiniácea *Vouacapoua americana* y la combretácea *Buchenavia capitata* presentan una elevada probabilidad de ampliar las listas de especies brasileñas en peligro de extinción, si la explotación de madera en la Amazonía continúa o acelera su ritmo depredador actual. Sólo en los años de 1996 y 1997, se explotaron 24.820 km^2 de bosques para producción de madera; se arrancaron 18.140 km^2, extrayendo 27,8 millones de metros cúbicos de madera.

Se pretende incrementar en un 10 % anual la producción de madera en la Amazonía, ampliando significativamente los 10.000 km^2 de bosque explotados cada año. Semejante incremento representa un peligro adicional para los árboles amazónicos, principalmente los que se hallan confinados en la zona de deforestación, donde se concentra la mayor parte de la explotación maderera.

Entre las especies de la Amazonía con valor maderero que corren riesgo se cuentan la morácea *Brosimum parinarioides* y la mimosácea *Parkia pendula*. Pertenecen al dosel y al estrato emergente la meliácea *Swietenia macrophylla,* la rutácea *Euxylophora paraensis,* la fabácea *Hymenolobium petraeum* y la miristicácea *Virola surinamensis*, especies sometidas a tala intensa. En su condición natural, la mayoría de los árboles del dosel y del estrato emergente de los bosques neotropicales aparecen con densidades muy bajas, de menos de un individuo adulto por hectárea. En muchísimos casos, las especies madereras amazónicas y atlánticas no alcanzan una densidad de 0,1 individuo por hectárea.

Por eso mismo, los árboles del dosel (25-35 m de altura) y del estrato emergente (por encima de 35 m) de la Selva Atlántica y de la Amazonía constituyen los dos principales grupos oficial, o potencialmente, amenazados de extinción en virtud de la acción aislada o combinada de pérdida de hábitat y explotación de productos forestales, madera sobre todo.



6. LAS PARCELAS FORESTALES AISLADAS, rodeadas por ambientes donde las condiciones físicas y biológicas son agresivas, pueden desaparecer ante la incesante expansión del efecto de linde hacia el interior de los reductos.

Inversión del proceso de extinción

Las estrategias para invertir el proceso de extinción de especies deben comenzar por suspender las amenazas. Pero no basta con ello. Importa preguntarse si, finalizada la reducción de los hábitats y de la explotación de madera y otros productos forestales, algunas especies de árboles y arbustos podrían correr peligro de extinción.

En algunos escenarios biológicos la respuesta podría resultar afirmativa. Abundan en la Selva Atlántica archipiélagos de fragmentos forestales (de menos de 50 hectáreas) con poca o ninguna conectividad. En estos archipiélagos, millares de especies leñosas se hallan expuestas a los impactos negativos del efecto de linde y privación de fauna, es decir, a la eliminación de los grandes animales del bosque a través da la caza. Entre las regiones más fragmentadas se encuentran una parte considerable de los bosques estacionales (820.000 km^2), parte de la selva de Araucaria (263.880 km^2) y el centro entero de endemismos de Pernambuco (56.000 km^2), bosques que representan cerca del 70 % de la superficie original de la Selva Atlántica brasileña. En lo que respecta a las poblaciones de árboles bastante castigadas por la pérdida de hábitat y por la explotación de madera, la ausencia de polinizadores y propagadores de semillas (que genera menor producción vegetal), la desecación del hábitat (que provoca mayor mortalidad de plántulas), el aumento de poblaciones de

BIOMA	AREA ORIGINAL (km^2)	AREA DEL TERRITORIO BRASILEÑO (%)	AREA DEL BIOMA DRASTICAMENTE ALTERADA (%)
AMAZONIA	3.688.982	43,2	17
FLORA ATLANTICA	1.107.256	12,9	93
CAATINGA	736.836	8,5	60
CERRADO	1.967.768	23,0	80
PANTANAL	136.851	1,6	–
CAMPOS SULINOS	171.386	2,0	–

lianas (que causa mayor mortalidad de subadultos), unidos a las elevadas tasas de caída de grandes individuos (que produce mayor mortalidad de adultos), pueden llevar a un declive definitivo de sus poblaciones y de los propios fragmentos, en diferentes escalas espaciales, en cuanto cese la acción antrópica directa.

La investigación reciente revela que, dependiendo de las características del paisaje que circunda a los fragmentos forestales (campos de labor, pastos, área urbana), las parcelas de hasta 1000 hectáreas pueden convertirse en fragmentos marginales y desaparecer por la continua expansión de plantas invasoras y ruderales e incluso por la acción del fuego. En consecuencia, la fragmentación representa una amenaza también para árboles y arbustos del sotobosque, que no siempre se incluyen en las listas rojas oficiales. Para árboles del dosel y del estrato emergente, la fragmentación agrega otras amenazas a la de los impactos directos de la explotación de madera.

De hecho, para invertir el proceso de extinción en los biomas brasileños es preciso entender la relación entre la fragmentación de hábitats y las principales amenazas, en particular las que penden sobre los árboles del dosel y del estrato emergente. Los estudios de campo en la Selva Atlántica y en la Amazonía han acumulado pruebas del sinergismo real entre pérdida de hábitat, fragmentación, efecto de linde, explotación de productos forestales, eliminación de vertebrados dispersores de semillas y frecuencia de incendios forestales. Conforme el bosque se parcela, lo que representa pérdida de hábitat, los islotes remanentes se tornan más accesibles a la caza y a la explotación de madera; el porcentaje de bosque convertido en marginal aumenta, propiciando el establecimiento de plantas invasoras.

La extracción selectiva de madera altera la estructura física del bosque. Por cada árbol talado de la selva amazónica de tierra firme, se daña a otros 20 o 30 y se abren grandes claros. Clareo del bosque, acumulación de material combustible (árboles muertos) e invasión de plantas ruderales tornan más vulnerables a los remanentes ante la posibilidad de incendios forestales provocados por la acción humana en el paisaje circundante.

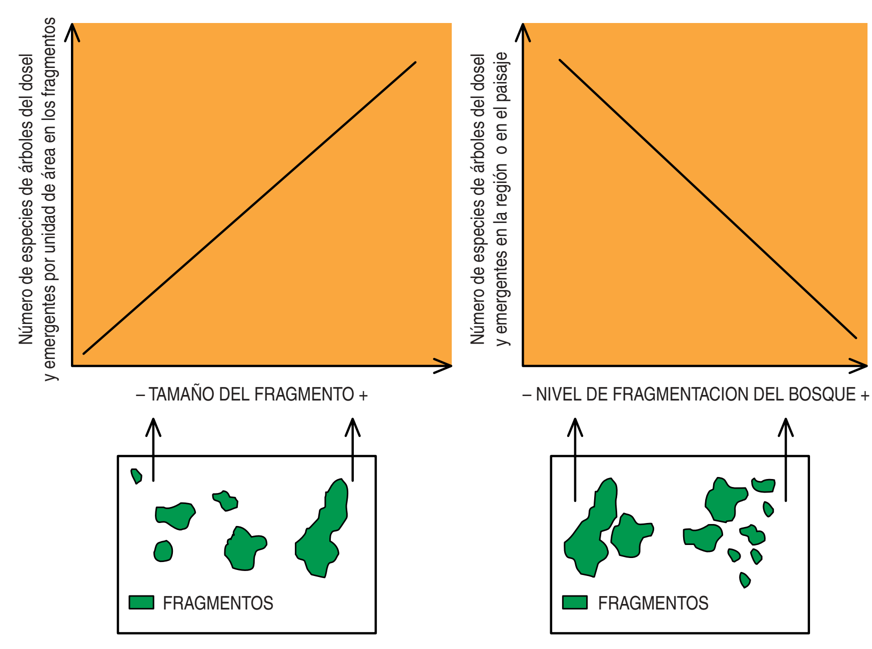
Si realmente la fragmentación está relacionada o incluso refuerza las amenazas de los árboles del dosel y del estrato emergente, resulta razonable prever que, a medida que avanza la parcelación de los bosques brasileños, aumenta la probabilidad de empobrecimiento del dosel en cualquier escala espacial. De ese modo se espera que cuanto menor sea el fragmento de bosque, menor será el número de especies de dosel y del estrato emergente por unidad de área; cuanto mayor sea el nivel de fragmentación, menor será la riqueza de especies del dosel y del estrato emergente a escala local o regional.

Acabamos de dibujar el escenario posible de las regiones boscosas de la Amazonía que sufren un proceso agresivo de explotación maderera (> 100 especies). Pero se trata también de un escenario posible para la Selva Atlántica, donde queda sólo entre el 1 y el 5 % de la vegetación original, dividida en miles de parcelas (en algunos casos más de 100.000), cercados por actividades que implican el uso periódico del fuego (renovación de pastos, quema de caña y agricultura de subsistencia).

Estrategias biológicas

El empobrecimiento del dosel no significa sólo la merma de riqueza en especies por unidad de área (por lo menos el 15 % de la flora vascular de los bosques neotropicales está constituida por especies de árboles), sino también una reducción en el número de estrategias biológicas, pues el dosel de estos bosques abriga una elevada diversidad de estrategias fenológicas, de dispersión y de polinización (mayor tal vez que la observada en el sotobosque). Pese a ser el dosel la última y, por

7. FRAGMENTACION, caza, explotación maderera, efecto de linde e incendios pueden operar de forma sinérgica propiciando el declive y la extinción local de poblaciones de árboles y arbustos.



8. CON EL NIVEL DE LA FRAGMENTACION de los bosques y la reducción del tamaño de los fragmentos forestales se espera una caída en la riqueza de especies de árboles del dosel y del estrato emergente en todas las escalas espaciales, es decir, en las parcelas, en el paisaje y en la región.

tanto, la frontera menos conocida de los bosques neotropicales, se admite ya la desaparición de un número significativo de insectos, reptiles y anfibios, amén de los estudiados mamíferos y aves, que viven y dependen de la diversidad de este ambiente.

Está demostrado que el dosel se empobrece con la fragmentación. En muchas parcelas boscosas de la Selva Amazónica y la Selva Atlántica, principalmente en las inferiores a 10 ha, se observa un triple fenómeno. En primer lugar, el dosel está dominado por un reducido número de árboles pioneros u oportunistas de claros (*Cecropia*, *Vismia*, *Trema*, *Alchornea*, *Tapirira*, *Solanum*, *Didymopanax*); en segundo lugar, la dominancia aumenta con la disminución del tamaño de los fragmentos; por último, el estrato emergente desaparece en los fragmentos pequeños y antiguos.

Difícilmente los árboles pioneros, con menor valor maderero y los más aptos para sobrevivir en bosques sumamente fragmentados, conseguirían, a escala local y regional, mantener la estructura física del dosel y toda su extraordinaria diversidad original de especies y estrategias biológicas únicas.

Invertir el proceso de extinción de especies requiere actuar en dos escenarios biológicos. En biomas sumamente fragmentados, tal como la Selva Atlántica, es necesario aliviar la presión sobre los recursos naturales y establecer amplios programas de restauración de la integridad física y biológica de una parte importante de estas biotas. En biomas que presentan porciones significativas todavía poco alteradas por la acción humana, es necesario evitar que los "nuevos frentes de ocupación humana" repitan el proceso de degradación ambiental sufrido por la Selva Atlántica, por el Cerrado y por la Caatinga.

En ambos casos, la planificación de paisajes sostenibles, donde la explotación de los recursos naturales se realiza de forma compatible con la preservación de procesos ecológicos que garantizan el mantenimiento de poblaciones silvestres y la integridad física y biológica de los ecosistemas, surge como una referencia de acción para todos los sectores de la sociedad preocupados por evitar la erosión del patrimonio biológico brasileño.

Por último, hemos de colocar el proceso de extinción en una perspectiva temporal. En 1968 existían 12 especies de plantas brasileñas *oficialmente* amenazadas de extinción. En 1992 se contaban 107 plantas vasculares, en 1997 ya eran 1380, considerando sólo las obras consultadas en este artículo. Actualmente hay más de 1500 especies oficialmente amenazadas en todo el territorio brasileño. A esta lista deben sumarse más de 320 especies de árboles y arbustos en peligro en algunas regiones de Brasil. Son datos contundentes que nos demuestran que, en biomas con alta riqueza de especies y alto nivel de endemismo, la pérdida de hábitat, fragmentación y explotación de productos forestales pueden comportar una combinación sinérgica capaz de amenazar parte significativa de la diversidad biológica y de los recursos naturales del país. Si el ritmo de alteración de los ecosistemas naturales continuara a ese ritmo, Brasil, que ya está entre los cinco países con el mayor número de especies de plantas amenazadas de extinción (y también de aves y mamíferos), acumulará un doble título: será el país de la megabiodiversidad y, también, el país de la megaamenaza.

Bibliografía complementaria

IUCN RED LIST OF THREATENED PLANTS. Dirigido por K. S. Walter y H. J. Gillett, IUCN: The World Conservation Union, Gland, Suiza y Cambridge, 1998.

LARGE-SCALE IMPOVERISHMENT OF AMAZON FORESTS BY LOGGING AND FIRE. D. Nepstad, A. Verissimo, A. Alencar, C. Noble, E. Lima, P. Lefebvre, P. Schlesinger, C. Potter, P. Moutinho, E. Mendoza, M. Cochrane y V. Brooks, en *Nature*, vol. 398, págs. 505-508; 1999.

RECEDING FOREST EDGES AND VANISHING RESERVES. C. Gascon, G. B. Williamson y G. A. B. Fonseca, en *Science*, vol. 288, págs. 1356-1358; 2000.

TREE SPECIES IMPOVERISHMENT AND THE FUTURE FLORA OF THE ATLANTIC FOREST OF NORTHEAST BRAZIL. J. M. Cardoso da Silva y M. Tabarelli, en *Nature*, vol. 404, págs. 72-74; 2000.



Inventario cósmico

Una inspección cósmica da a entender que se completará pronto el catálogo de los cuerpos luminosos de los cielos

Günther Hasinger y Roberto Gilli

1. LA MAYOR PARTE DE LA LUZ del universo procede, seguramente, de galaxias atormentadas como M82, donde se originan diez veces más estrellas que en la Vía Láctea y en cuyo centro debe de esconderse un agujero negro; están con frecuencia oscurecidas por nubes de polvo muy espesas. Su abundancia se ha descubierto sólo en los últimos años.

Día tras día, nos encontramos en el periódico con algún descubrimiento astronómico: un objeto celeste, un proceso físico, una forma de la materia nuevos. ¿Llegará el día en que no quede nada por descubrir, en que se tenga ya el inventario completo del universo? Si la pregunta se formula en términos tan amplios, la respuesta es negativa: se sabe muy bien que no se puede observar directamente todo lo que existe en el universo; sorpresas, además, siempre las habrá. Pero una pregunta un poco más restringida —¿se terminará la cuenta de las estrellas, galaxias y otras agregaciones luminosas?— tiene una respuesta muy diferente. Llegará el momento en que se conocerá el grueso de la luz del universo, y se acerca muy deprisa.

Con los años, los astrónomos han elaborado una especie de control de calidad que les avisa de que se les ha escapado una fuente importante de luz. Consiste en estudiar un fenómeno que para la mayoría de las observaciones es una molestia: la radiación de fondo. Si un científico, de la disciplina que sea, habla de un "fondo", se refiere a todo, menos a lo que le interesa. Cuando los telescopios captan la radiación de una estrella, no se puede evitar que capten también la de otros cuerpos, más cercanos y más lejanos. Esa luz de más sólo sirve para disminuir la precisión de las mediciones deseadas.

Quienes estudiamos la radiación de fondo centramos nuestra atención precisamente en lo que nuestros colegas dejan de lado. Primero sumamos toda la luz que llega de una determinada región del espacio. Luego restamos de manera sistemática las contribuciones debidas a los objetos conocidos, estrellas, galaxias, nu-

bes de gas —el "primer plano"—. Si queda algún residuo, algunos brillos difusos de origen indeterminado, sabremos que nuestro censo de los objetos celestes está todavía incompleto.

A veces se observan brillos difusos cuando los objetos están muy juntos y el telescopio carece de resolución angular suficiente para separarlos. Unos sencillos prismáticos convierten a la Vía Láctea, a simple vista una mancha blanquecina, en millones de puntos luminosos. En otras ocasiones el brillo difuso tiene su origen en fuentes que son de por sí difusas, como el polvo zodiacal del sistema solar o los remanentes gaseosos de las supernovas de nuestra galaxia. El fondo cósmico, la radiación que llena el universo, procede de mucho más allá.

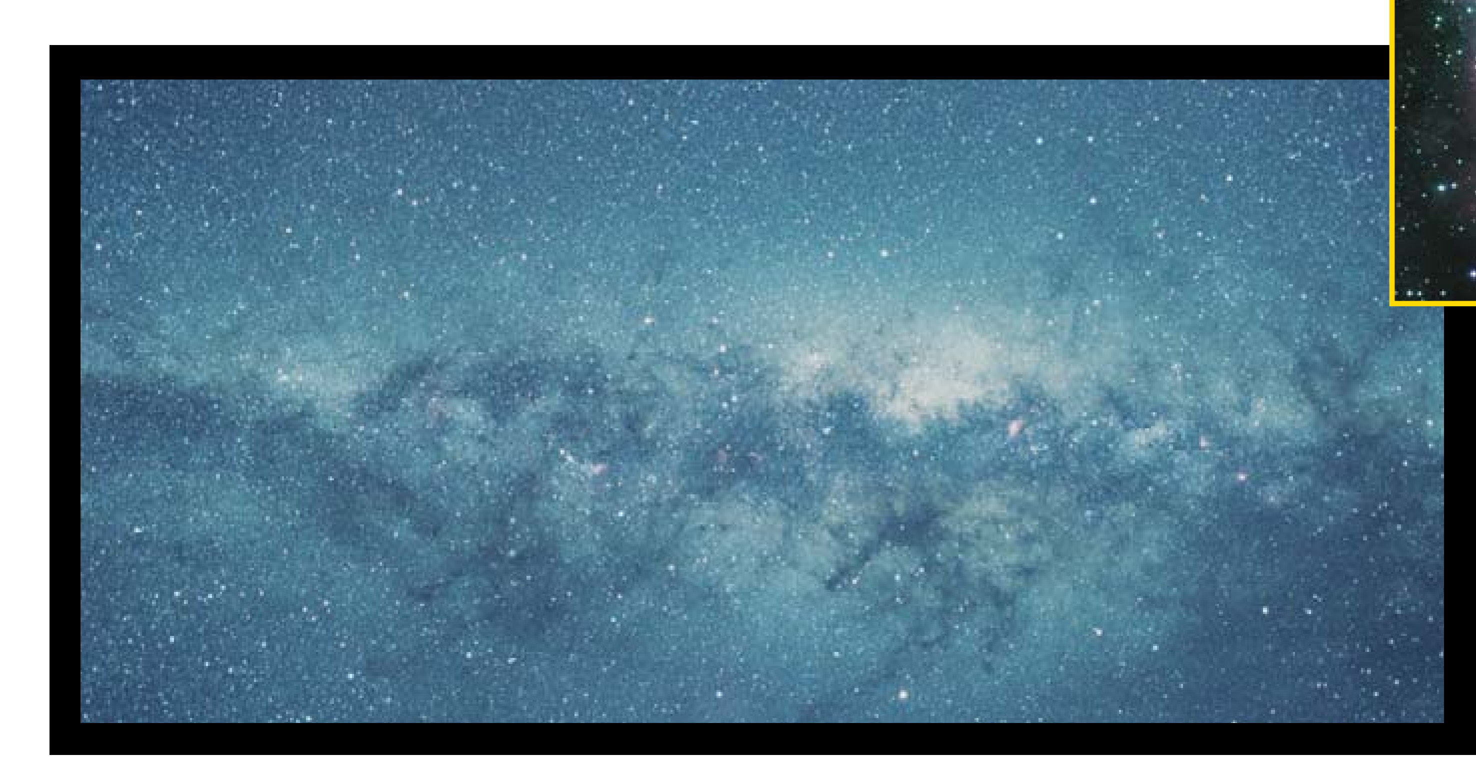
En los últimos cinco años, a medida que los telescopios han mejorado en sensibilidad y resolución, se ha ido encontrando un número creciente de estos brillos difusos. Así hemos descubierto que nuestros catálogos anteriores del universo eran incompletos: habíamos subestimado, por ejemplo, la cantidad de agujeros negros de masa muy elevada (*supermasivos*). Lejos de ser objetos aislados y raros, como se pensaba, están en todas partes. Los estudios precedentes no habían dado con ellos porque están sumergidos en inmensas cantidades de polvo. Pero ahora, con los agujeros desvelados, quizás explicaremos exhaustivamente el fondo.

No quiere decir que ya hemos visto todo lo que hay que ver. No podemos catalogar todos los objetos celestes; tampoco pueden los biólogos censar todos los insectos. Pero al igual que éstos pueden decir que conocen las especies principales, los astrónomos están a punto de identificar las clases mas importantes de objetos emisores de luz.

Sin perder el más leve suspiro

Cuando los aficionados a la astronomía oyen la palabra "fondo", piensan en la famosa radiación del fondo cósmico de microondas (FCM). Esta ubicua radioemisión parece tener un origen realmente difuso, un plasma caliente que llenaba el universo cuando éste sólo tenía 400.000 años. A causa de la expansión cósmica, el pico de esa radiación se observa hoy a una longitud de onda de alrededor de un milímetro, correspondiente a una temperatura de 2,7 kelvin. El espectro y la distribución del FCM apoyan con firmeza la teoría de la gran explosión.

Sin embargo, el FCM es sólo una parte de un conjunto. El fondo electromagnético completo consta de distintos componentes, cada uno de las cuales domina un intervalo determinado de longitudes de onda: además del FCM, están el fondo cósmico de rayos X (FCX), el fondo cósmico de infrarrojos (FCI) y el fondo cósmico óptico (FCO), menos conocidos que aquél.



2. LA VIA LACTEA, A SIMPLE VISTA POCO MAS QUE UN BORRON, se resuelve en cien mil millones de estrellas cuando se la observa con un telescopio. El recuadro menor muestra en detalle la constelación de Ara. De forma análoga, el fondo cósmico —el brillo débil que llena el espacio entre las estrellas— también parecía un borrón. En los últimos años, los telescopios han avanzado lo suficiente como para distinguir las fuentes de luz individuales, muchas de las cuales representan nuevos tipos de galaxias.

La medición precisa de estos componentes constituye una de las tareas más arduas de la astronomía observacional. Parece muy simple conceptualmente: mirar al cielo para medir la señal total y después restar las fuentes conocidas que hay entre la Tierra y el universo profundo (el "primer plano"), el ruido de los detectores, las señales del interior de nuestro sistema solar, la emisión del resto de nuestra galaxia y otras radiaciones que pueda haber. Además, hay que corregir cualquier atenuación de la señal del fondo por el "primer plano".



Sin embargo, llevar a cabo todas estas sustracciones con suficiente precisión es complicado; la resta amplifica el error. A ciertas longitudes de onda se tiene la suerte de que el fondo es la emisión más brillante del cielo, pero en otras bandas hay que extraer un suspiro cósmico del rugido del primer plano. Con frecuencia, el factor que limita el análisis es la precisión con que se conoce la emisión de ese primer plano. Se intenta evitar el problema concentrándose en regiones del cielo casi vacías de estrellas y de otras fuentes conocidas —cuanto más aburridas, mejor—. A pesar de todos estos obstáculos, ahora se ha podido determinar el espectro del fondo cósmico para un amplio intervalo de longitudes de onda con una precisión bastante grande (*véase la figura 6*).

La componente de rayos X, descubierta en 1962, tiene una joroba característica alrededor de los 30 kiloelectronvolt (keV) —viene a ser casi la longitud de onda empleada por los médicos— y una cola bastante larga hacia energías mayores, hasta los rayos gamma. Por debajo de alrededor de 1 keV, y superpuesto a ese continuo, se encuentra un gran número de líneas atómicas de emisión; parecen ser las huellas de un gas calentado a varios millones de grados kelvin que, con gran probabilidad, se halla dentro o alrededor de nuestra galaxia.

En los años setenta, los primeros satélites de rayos X —UHURU, ARIEL V y HEAO-1— probaron que la radiación X de alta energía se extiende con uniformidad por todo el cielo. Su origen, pues, tiene que ser extragaláctico (es decir, de fuera de la Vía Láctea): si viniera del sistema solar o de nuestra galaxia, el brillo se concentraría en ciertas direcciones determinadas, coincidentes con el plano de nuestro sistema o con el disco galáctico. Los satélites de rayos gamma —el SAS-3, COS-B y el observatorio Compton de rayos gamma— han encontrado una uniformidad similar incluso a mayores energías.

Mientras que el FCM y el FCX dominan el cielo en sus respectivas longitudes de onda, las otras componentes del fondo cósmico sólo contribuyen con una fracción muy pequeña de la radiación total de sus bandas. Hace unos años, varios grupos detectaron, por separado, la señal del fondo en el infrarrojo lejano, la cola de alta frecuencia del FCM. En el infrarrojo cercano y medio, la brillante luz zodiacal oscurece por completo el fondo; se interpolan, pues, las medidas de otras bandas de longitudes de onda. También se obtienen límites superiores a partir de las observaciones de los rayos gamma de alta energía: una niebla demasiado tupida de fotones infrarrojos interferiría la propagación de los rayos gamma. Sólo se han podido tomar medidas directas infrarrojas en los dos últimos años.

Rebecca A. Bernstein, de la Universidad de Michigan, y sus colaboradores anunciaron en diciembre pasado las primeras mediciones directas del fondo en el óptico y en el ultravioleta. Antes de este trabajo, los astrónomos se apoyaban en las restricciones derivadas de la suma de la luz de las galaxias más débiles vistas por el telescopio espacial Hubble. En el ultravioleta extremo, el fondo aparece oscurecido por el medio interestelar; su nivel de brillo se estima interpolando entre las mediciones en el ultravioleta y en rayos X.

Escondido en el fondo

Para aprovechar la radiación de fondo como una especie de control de la calidad, se han desarrollado diversos métodos que comparan lo que se mide con lo que se espera. No es tarea fácil. El fondo es una mezcla intrincada de luces de varias clases de objetos astronómicos. La luz de las estrellas, originada en la fusión termonuclear, se concentra en el infrarrojo cercano, óptico y ultravioleta. Los cuásares y otros núcleos activos de galaxias (NAG), cuyos agujeros negros succionan la materia y convierten de forma muy eficiente la energía gravitatoria en energía de radiación, brillan en una banda muy ancha, que abarca desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Las nubes de polvo absorben casi toda la luz óptica, ultravioleta y de rayos X; vuelven a radiar esa energía en el infrarrojo lejano. Para complicar las cosas aún más, el fondo mezcla la luz de objetos a distancias cósmicas muy distintas y con estados de evolución muy diferentes.

Un procedimiento consiste en realizar búsquedas intensivas en el cielo: observar con la máxima resolución y sensibilidad posibles para detectar las fuentes individuales inmersas en el fondo. La comparación de lo hallado a diferentes longitudes de onda determina qué tipo de objetos sean esas fuentes. Este método directo, sin embargo, sólo puede alcanzar la precisión necesaria con objetos que tengan cierto brillo y en regiones muy circunscritas del cielo. Para una vista más general utilizamos una segunda técnica, la síntesis de poblaciones: se calcula la emisión esperada de una posible combinación de objetos, se compara esta predicción con las medidas del fondo y se siguen probando diferentes combinaciones hasta que una reproduzca lo observado.

Puesto que el FCX fue el primer fondo cósmico identificado, ha sido estudiado más en detalle que

cualquier otro componente. La cuestión básica —¿se origina en fuentes no resueltas o en una clase de gas difuso desconocido hasta la fecha?— se debatió durante más de treinta años [*véase* "El origen de la radiación cósmica X de fondo", por Bruce Margon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1983]. En el decenio de 1990, una argumentación indirecta zanjó por fin la cuestión. Si el FCX se originase en el gas caliente intergaláctico, éste sería una pantalla que distorsionaría nuestra visión del fondo cósmico de microondas; el espectro del FCM se apartaría del característico de un cuerpo negro perfecto. Y, sin embargo, las observaciones del FCM, sobre todo las del Explorador del Fondo Cósmico (COBE), no muestran tal discrepancia. Por tanto, sólo una fracción pequeña del fondo de rayos X proviene de un gas así; un gas más frío podría también contribuir, pero, en su mayor parte, el FCX debe de nacer de fuentes individuales no identificadas.

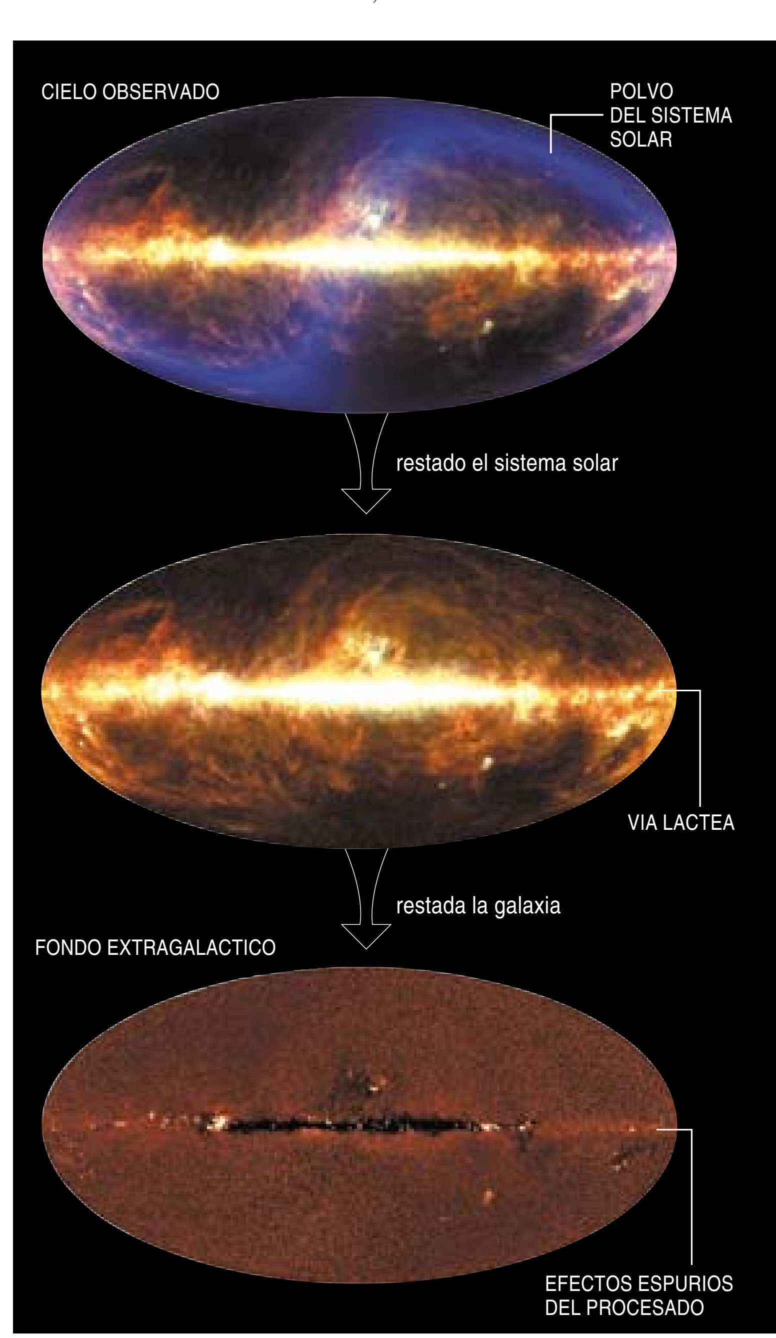
¿Cuáles podrían ser esas fuentes? Riccardo Giacconi, el descubridor del FCX, y otros investigadores realizaron en el decenio de 1980, con el satélite Einstein de rayos X (HEAO-2), las primeras búsquedas intensivas encaminadas a hallar una respuesta. Resolvieron alrededor de una quinta parte del fondo de rayos X en fuentes individuales, cuásares entre ellas. El satélite ROSAT continuó el trabajo. En 1984, un grupo de científicos —Giacconi, Maarten Schmidt (el descubridor de los cuásares), Joachim Trümper (el padre del ROSAT) y uno de nosotros (Hasinger)— se reunió en el Instituto Max Planck para la Física Extraterrestre, en Garching, Alemania, con el fin de diseñar unas búsquedas profundas con el satélite. Tras su lanzamiento en 1990, el rastreo se convirtió en una empresa de amplias proporciones; duraron una década y participó un gran número de colaboradores, más de los que podrían ser citados en estas páginas.

Las búsquedas profundas del ROSAT en el llamado agujero de Lockman —una región próxima a la Osa Mayor libre casi de cualquier absorción superpuesta— están entre las más largas y profundas, ópticas y en rayos X, jamás realizadas. Resolvieron alrededor del 80 por ciento del fondo de rayos X a energías de menos de 2 keV (el intervalo de los rayos X "blandos"). La mayor dificultad residió en la identificación de las fuentes ópticas. Tenemos que buscar, en las imágenes ópticas profundas, objetos ligados a las fuentes de rayos X, pero suelen ser muy débiles. Luego hay que obtener sus espectros, que revelan las propiedades de los objetos y su desplazamiento al rojo (una medida de la distancia). Aunque este trabajo no sería posible sin el telescopio gigante Keck, hasta su espejo de 10 metros resulta pequeño para recoger luz suficiente de los objetos ópticos asociados más débiles.

Alrededor del 80 por ciento de las fuentes captadas por el ROSAT han resultado ser núcleos de galaxias activas de varios tipos, sobre todo cuásares muy luminosos y galaxias Seyfert de tipo 1. Las anchas líneas de emisión de los espectros de estos NAG indican que tenemos una visión clara de sus regiones más interiores, donde los monstruosos agujeros negros se devoran a sí mismos.

Envueltos en polvo

Los demás NAG, sin embargo, sólo presentan líneas de emisión estrechas, si no carecen de ellas

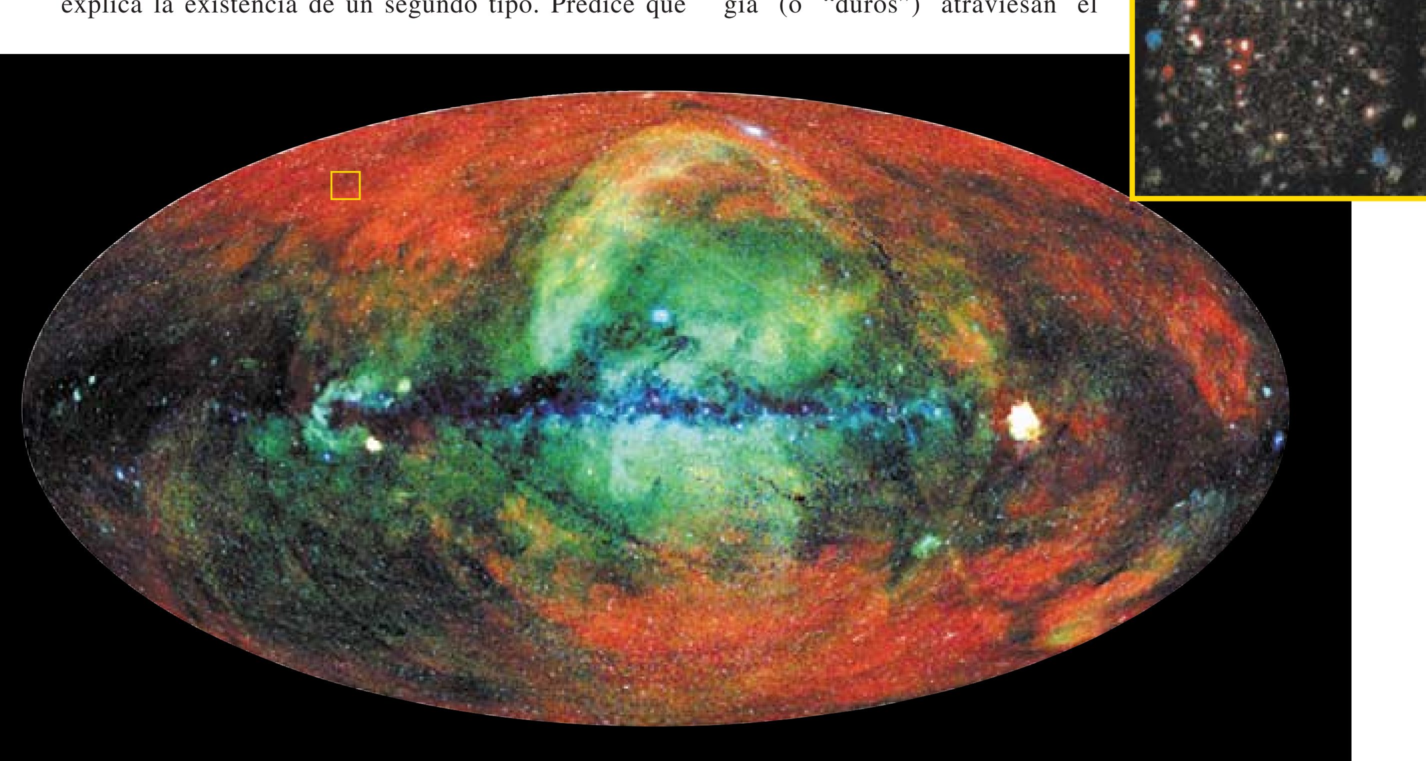


3. EL ESTUDIO DEL FONDO COSMICO recuerda la limpieza de las capas de pintura, una tras otra, para dejar al descubierto una pared: se toma una imagen del cielo, se resta la luz de los objetos conocidos y se ve qué queda. En estas imágenes, que combinan las longitudes de onda del infrarrojo lejano a 60 (*azul*), 100 (*verde*) y 240 (*rojo*) micras, se proyecta el cielo de manera que la Vía Láctea se extiende a lo largo de la parte central; el plano de los planetas adopta una forma en S.

por completo; da a entender que el gas y el polvo están bloqueando nuestra visión de los agujeros negros centrales. Los NAG dotados de esa característica entran en el grupo de cuásares de tipo 2 o galaxias Seyfert de tipo 2. El "modelo unificado" de los NAG, propuesto a mediados de los años ochenta, explica la existencia de un segundo tipo. Predice que todos los NAG contienen, no sólo un agujero negro central, sino también un toro de gas y polvo, que, según cómo esté orientado, puede o no tapar al agujero negro. Desde entonces se ha actualizado el modelo, pero la predicción básica no ha cambiado: sólo vemos NAG sin oscurecer (tipo 1) o muy oscurecidos (tipo 2).

Aunque las búsquedas en rayos X blandos mostraron que los NAG son las fuentes dominantes de la radiación de fondo de rayos X, surgió una nueva paradoja cuando se recurrió al segundo procedimiento, la síntesis de poblaciones. Al combinar los espectros de los diferentes NAG en razón de las proporciones observadas, el resultado debería haber sido el espectro del FCX. No fue así. Los espectros de los NAG son planos o cóncavos, mientras que el del FCX presenta un pico en 30 keV.

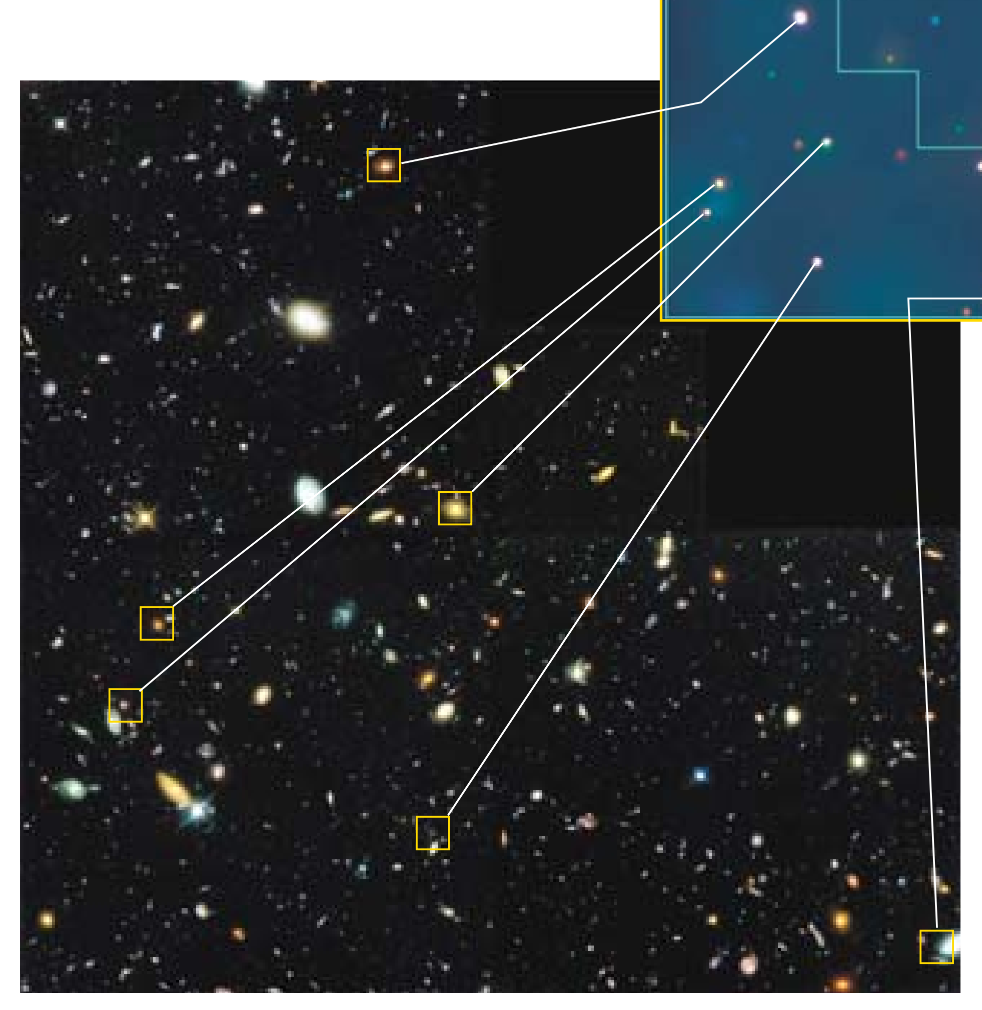
En 1989, Giancarlo Setti, de la Universidad de Bolonia, y Lo Woltjer, del Observatorio de la Alta Provenza, que entonces trabajaban juntos en el Observatorio Austral Europeo, con sede en Garching, propusieron una solución. Según su hipótesis, los modelos de síntesis de poblaciones no habían sumado los NAG en la proporción correcta. Al contrario de lo que se pensaba, las fuentes del fondo de rayos X podrían ser en su mayoría NAG de tipo 2. Los rayos X de alta energía (o "duros") atraviesan el polvo y el gas que hay alrededor de los agujeros negros; los blandos, en cambio, son absorbidos. El espectro global del FCX no coincidiría, pues, con el de los NAG brillantes.



4. EN UNA IMAGEN EN RAYOS X DEL CIELO, la radiación del fondo cósmico es fácil de ver: se trata de la neblina que hay fuera de la Vía Láctea (*barra horizontal*). El satélite ROSAT, que obtuvo esta imagen, también observó en detalle el agujero de Lockman, una zona del cielo donde se detecta muy bien el fondo (*recuadro pequeño*). El recuadro amarillo muestra su localización aproximada. Los colores representan los rayos X de alta energía (*azul*), energía media (*verde*) y baja energía (*rojo*).

Con esta idea presente, buscaron los creadores de modelos de síntesis de poblaciones una mezcla de los tipos 1 y 2 que explicase el espectro del FCX, teniendo en cuenta la evolución de estos objetos con el tiempo. Tal y como demostraron en 1995 Andrea Comastri, entonces en el Instituto Max Planck para la Física Extraterrestre, y sus colaboradores, es posible reproducir el espectro hasta los 300 keV si la mayor parte de la energía —80 % al 90 %— se produce en agujeros negros oscurecidos por nubes de gas y polvo. Si es así, los agujeros abundaron cien veces más en los primeros tiempos del universo que hoy; dicho de otra manera: se formaron en casi todas las galaxias. De no ser por la radiación de rayos X del fondo cósmico, habrían pasado, sin embargo, inadvertidos.

Se da una paradoja similar en los fondos ópticos e infrarrojos (FCO y FCI, respectivamente). Es muy



5. GALAXIAS LEJANAS Y POLVORIENTAS —el eslabón perdido en el conocimiento de la radiación de fondo—, según aparecen en el famoso Campo Profundo del Hubble (*arriba*) y en una imagen en rayos X de la misma región tomada por el satélite Chandra (*recuadro superior*). Se las ha identificado comparando ambas imágenes. La mayoría debe su brillo a unos agujeros negros supermasivos.

probable que el FCO sea la suma de las emisiones de las estrellas, enrojecidas por la expansión del universo. El FCI, por otra parte, tiene el espectro de un gas a temperaturas de 10 a 100 kelvin, también enrojecido. En última instancia, la energía de la emisión del polvo ha de originarse en las estrellas y los NAG. Sin embargo, el FCI brilla tanto o más que el FCO. Es como si la Luna (que sólo refleja la luz solar) hiciera que el propio Sol (la fuente de esa luz reflejada). Al igual que la paradoja de los rayos X, la solución lógica de esta otra paradoja, óptica e infrarroja, estriba en suponer que muchas fuentes del universo están envueltas en gas y polvo.

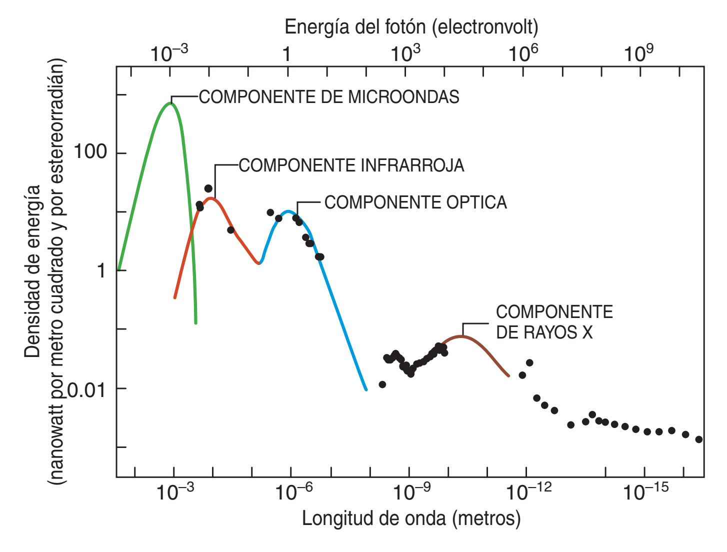
Con el fin de confirmar tales hipótesis, se estudia la radiación de fondo a las longitudes de onda para las que, se supone, cualquier material oscurecedor es transparente: las de los rayos X duros. Esta radiación tan potente puede atravesar el polvo como si no estuviera ahí. Los dos nuevos observatorios de rayos X ahora en órbita, el Observatorio Chandra (con una resolución angular soberbia) y el XMM-Newton (que cubre un área considerable), han extendido los estudios del ROSAT hacia energías bastante mayores, hasta los 10 keV, aunque todavía no alcanzan el pico de la emisión de rayos X del fondo. Hasta la fecha, las búsquedas en rayos X más sensibles han sido las efectuadas con el Chandra por los grupos que dirigen Giacconi, ahora en la Universidad Johns Hopkins, y Gordon P. Garmiere, de la Universidad del Estado de Pennsylvania, en dos regiones distintas del cielo, el "campo sur profundo de Chandra" y "el campo norte profundo del Telescopio Espacial Hubble".

La investigación sobre la correlación con las observaciones ópticas acaba de comenzar. Hasta ahora, las fuentes identificadas son una mezcla de NAG de tipo 1 y 2, en excelente concordancia con los modelos. Reviste también interés que casi el 10 por ciento de las fuentes de rayos X descubiertas por Chandra sean galaxias muy débiles: galaxias normales, cabe suponer, que no tienen un NAG. Su emisión en rayos X se asocia sobre todo al gas calentado por la formación de estrellas.

Cerca, las GULIR

Los dos procedimientos principales para el estudio del fondo dejan algo que desear. Las búsquedas intensas exprimen hasta el máximo las posibilidades de la técnica y la síntesis de poblaciones es bastante abstracta. Por eso se ha ideado un tercer método: rastrear el universo cercano para descubrir hermanas de las galaxias de tipo 2 lejanas.

Se ha encontrado lo que se buscaba en la galaxia NGC 6240. Se trata de una de las ovejas negras de las proximidades de la Vía Láctea; pertenece a la exótica clase de las galaxias infrarrojas ultraluminosas (GULIR). Emiten la mayor parte de su energía total en el infrarrojo lejano, un signo evidente de que están saturadas de polvo. El polvo se compone de elementos químicos pesados sintetizados en las



6. EMPALMANDO LAS OBSERVACIONES (*puntos*) tomadas a distintas longitudes de onda, se ha construido el espectro de la radiación de fondo. Se observan claramente cuatro componentes (*curvas continuas*); sus picos están a diferentes longitudes de onda y representan mecanismos distintos de generación de luz. Hoy día se conoce el origen de casi toda la energía de fondo. (Un estereorradián es aproximadamente 1/13 de una esfera.)

estrellas que, al morir éstas, se esparcieron por el espacio; una cantidad enorme de polvo significa, por tanto, que también es ingente el número de estrellas que se forman. La Vía Láctea genera unas pocas al año; NGC 6240 debe de estar creándolas a cientos, y no sólo mantiene una formación estelar tan intensa, sino que ha de habérselas con uno de los agujeros negros más voraces del universo cercano.

El espectro global de NGC 6240 tiene la misma estructura que el del fondo cósmico. Posee todos los ingredientes que necesitamos para explicar el fondo, pero aún debemos mezclarlos en las proporciones adecuadas.

Viendo cómo es NGC 6240, se le ha hallado una explicación natural a la inesperada abundancia de NAG de tipo 2 en el universo temprano: los NAG estaban acompañados de brotes intensos de formación estelar. Las estrellas escupieron polvo, que oculta los agujeros negros. Se acumulan las pruebas de que la formación de estrellas y el cebado de agujeros negros abundaban mucho más en el pasado que hoy.

Los autores

GÜNTHER HASINGER Y ROBERTO GILLI comenzaron a estudiar juntos la radiación de fondo de rayos X en el Instituto de Astrofísica de Potsdam, que dirigía Hasinger y donde Gilli realizó parte de su tesis doctoral. Hasinger, hoy director del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre, en Garching, se dedica sobre todo a la observación, en tanto que Gilli, ahora en el Observatorio Arcetri de Florencia, trabaja en la creación de modelos.

Los dos procesos parecen haber experimentado su máximo más o menos al mismo tiempo en la historia cósmica.

¿Por qué los NAG y los brotes de formación estelar van de la mano? Es muy probable que los dos procesos provengan del mismo origen, los choques de galaxias, que hacen que el gas se precipite en espiral hacia el centro de la galaxia, donde crea estrellas o cae en el agujero. Casi todas las GULIR, incluyendo NGC 6240, presentan signos de haber chocado con otra galaxia. Por otra parte, no todos los NAG parecen estar ligados a grandes colisiones.

Muchos piensan que la conexión entre los NAG y los brotes de formación de estrellas debe de ser más estrecha; no reducirse a compartir un mismo combustible. Los agujeros negros podrían alimentar directamente el fuego de la formación estelar, o las estrellas proporcionar material al agujero. Es posible incluso que las estrellas y los agujeros supermasivos sean simbióticos, que se necesiten mutuamente para existir. Estas conexiones explicarían la correlación observada entre las propiedades de las galaxias y sus agujeros negros centrales.

Con el aliento recibido del estudio de NGC 6240 y de galaxias similares, se ha recurrido a la síntesis de poblaciones para comprobar si los NAG y los brotes de formación estelar podían explicar no sólo el fondo de rayos X, sino también los fondos óptico e infrarrojo. Parece que no. Las observaciones conjuntas de Chandra y del instrumento SCUBA, que observa en longitudes de onda submilimétricas, entre el radio y el infrarrojo, no encuentran particular solapamiento. El grupo de Omar Almaini, del Real Observatorio de Edimburgo, calculó que el 30% del fondo cósmico infrarrojo se debe en última instancia a los NAG. Hasinger y sus colaboradores obtuvieron, mediante la combinación de las medidas del XMM y del Observatorio Espacial Infrarrojo del Agujero de Lockman, un límite menor —un 15%— a la contribución de los NAG al fondo infrarrojo.

El grupo encabezado por Elese N. Archibald, del Centro Astronómico Conjunto, en Hilo, Hawai, atribuye estos hallazgos a una consecuencia natural de la formación de las galaxias. Según el modelo que proponen, las galaxias nacen alrededor de un agujero negro semilla más bien pequeño (de 10 a 1000 masas solares). Al principio, la luz de las estrellas es el mayor componente de la energía total de la galaxia: el agujero central no ha crecido aún, pero va aumentado de tamaño exponencialmente porque traga materia con la máxima celeridad. Pasados unos 500 millones de años, ha adquirido tal masa (mil millones de veces la solar), que la materia que cae hacia él sobrepasa en brillo a las estrellas. Nace entonces el cuásar; algún tiempo después, se ha tragado todo el combustible disponible y queda dormido, hasta que cae nuevo gas hacia el centro y lo despierta. El agujero podría incluso fusionarse con otro de tamaño parecido.

No obstante, hay quienes opinan que aún faltan piezas fundamentales del rompecabezas: galaxias demasiado esparcidas para que se pueda verlas direc-

tamente o estrellas que se formaron antes que las galaxias [*véase* "Estrellas primigenias", por Richard B. Larson y Volker Bromm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2002]. Se han propuesto otras fuentes diferentes de los NAG para explicar la cola de muy alta energía que se observa en el FCX; por ejemplo: una parte considerable de los rayos gamma quizá fuera generada por los electrones catapultados a velocidades grandísimas durante la formación de la nanoestructura del universo.

Se necesitan más búsquedas intensivas para conocer los procesos dispares que contribuyen al fondo; algunos observatorios del futuro —como el Telescopio Espacial Infrarrojo (SIRTF), el Telescopio Herschel para el Infrarrojo Lejano, el Telescopio Espacial de la Próxima Generación y la Gran Red Milimétrica de Atacama— tendrán que estudiar algunos de los objetos que los satélites de rayos X vayan descubriendo. La espectrometría en rayos X que realizará la proyectada misión XEUS podría resultar crucial. Se espera que mida los desplazamientos al rojo sólo con información de rayos X; de esta forma se estudiarían objetos muy oscurecidos que no se ven en el óptico. Así quizá se explicaría por fin la conexión misteriosa entre las galaxias y sus agujeros negros centrales, se deduciría qué se formó primero y se descubriría qué relación guarda la formación estelar con la actividad del agujero negro.

El brillante cielo nocturno

El estudio del fondo es un ejemplo clásico de que nada en astronomía es lo que aparenta. La simple presencia de un fondo quiere decir que, pese a la impresión que da, el cielo nocturno no es del todo oscuro. A lo largo de la historia se ha dado por cierto que sí lo era; se quería saber el porqué. En un universo infinito lleno de estrellas, cada línea de visión debería toparse con una de ellas; el debilitamiento de la luz estelar con la distancia quedaría compensado por el número creciente de estrellas con la lejanía y la noche brillaría como la superficie del Sol. Son día y noche.

Resolvió este problema, o paradoja de Olber, Edgar Allan Poe, en 1848. Argumentaba en su poema en prosa "Eureka" que quizá las estrellas no hubiesen tenido tiempo suficiente para llenar el universo con su luz. La oscuridad de la noche nos dice, pues, que el universo no ha existido siempre. No sólo ha resistido esta hipótesis el paso del tiempo; sería fundamental en la formulación de la teoría de la gran explosión.

La noche no es totalmente negra. La baña el fondo cósmico. El avance en el conocimiento de éste ha sido grande, pero aún queda mucho por hacer. Los pensadores del siglo XIX querían explicar por qué el cielo nocturno no es un ascua; los cosmólogos modernos deben averiguar por qué no es absoluta oscuridad.

Bibliografía complementaria

THE ROSAT DEEP SURVEY I: X-RAY SOURCES IN THE LOCKMAN FIELD. G. Hasinger, R. Burg, R. Giacconi, M. Schmidt, J. Trümper y G. Zamorani en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 329, n.º 2, págs. 482-494; enero de 1998.

RESOLVING THE EXTRAGALACTIC HARD X-RAY BACKGROUND. R. F. Mushotzky, L. L. Cowie, A. J. Barger y K. A. Arnaud en *Nature*, vol. 404, págs. 459-464; 30 de marzo de 2000.

THE COSMIC INFRARED BACKGROUND AT 1.25 MICRON AND 2.2 MICRON USING DIRBE AND 2MASS: A CONTRIBUTION NOT DUE TO GALAXIES? L. Cambrésy et al. en *Astrophysical Journal*, vol. 555, n.º 2, págs. 563-571; 10 de julio de 2001.

WONDERING IN THE DARK. Ken Croswell en *Sky & Telescope*, vol. 102, n.º 6, págs. 45-50; diciembre 2001.

TESTING CURRENT SYNTHESIS MODELS OF THE X-RAY BACKGROUND. R. Gilli, M. Salvati y G. Hasinger en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 366, n.º 2, págs. 407-417; febrero de 2001.

Neurobiología del maltrato en la infancia

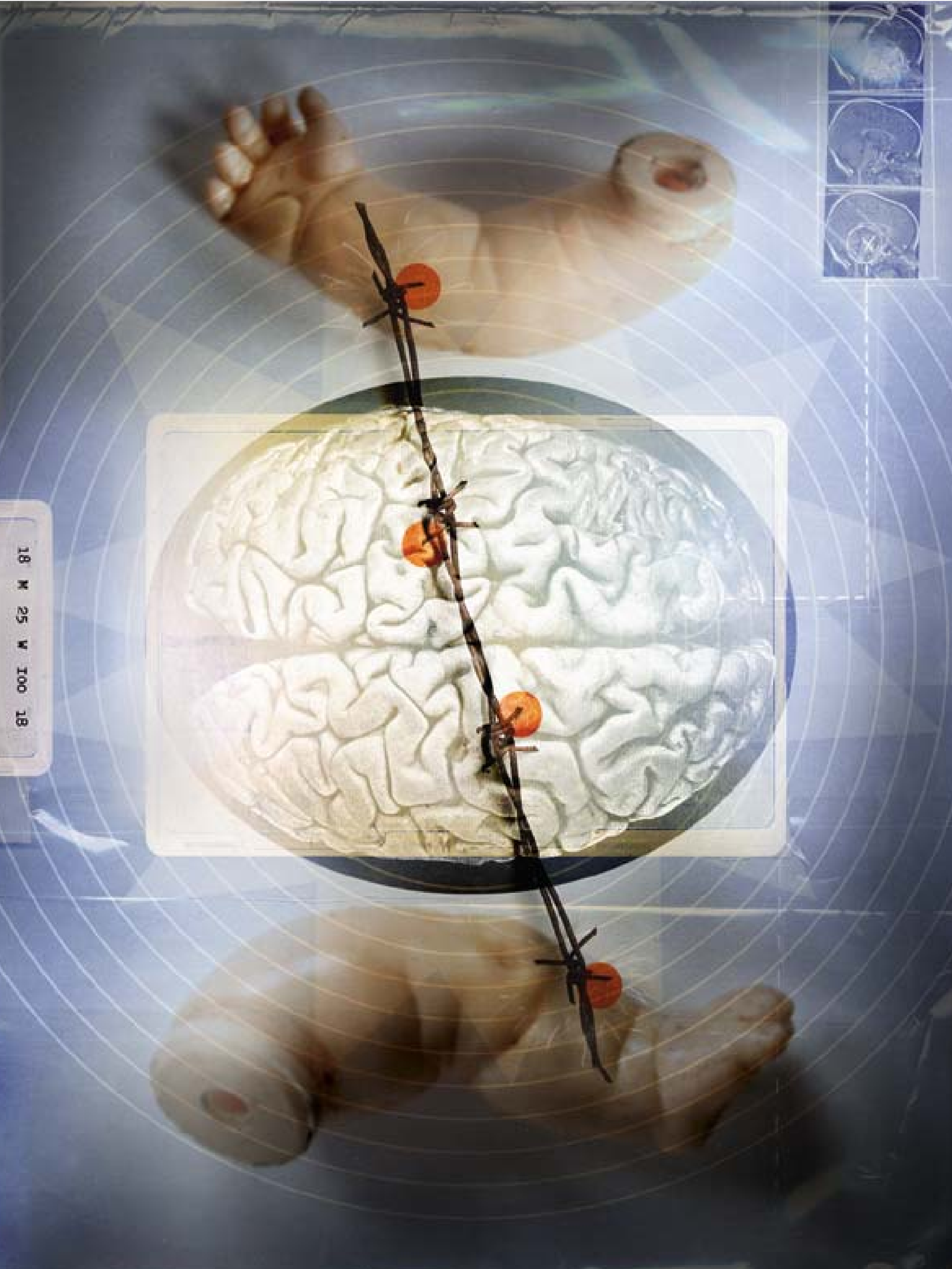
El maltrato sufrido a una edad temprana puede tener efectos negativos duraderos en el desarrollo y las funciones del cerebro infantil

Martin H. Teicher

En 1994 unos policías de Boston se quedaron impresionados al encontrar a un desnutrido pequeño de cuatro años encerrado en un sucísimo apartamento de Roxbury, donde subsistía en sórdidas condiciones. Peor aún, tenía las manos abrasadas. Su madre, drogadicta, se las puso bajo un chorro de agua hirviente para castigarle por haberse comido, pese a que le había dicho que no lo hiciera, la comida de su amante. Y no había sido objeto de ninguna cura ni de atención médica. Este caso estremecedor saltó enseguida a los grandes titulares de la prensa. Tomado luego el niño en adopción, se le hicieron injertos de piel para que las manos recuperaran sus funciones. Pero aunque las heridas físicas de la víctima fueron debidamente tratadas, los resultados de las más recientes investigaciones indican que quizá nunca se subsanen los daños infligidos a su mente en desarrollo.

Por desgracia, casos tan extremos no son infrecuentes: en los EE.UU. las instituciones asistenciales reciben cada año más de tres millones de denuncias de malos tratos, abusos o abandonos de niños, y reúnen pruebas suficientes para confirmar más de un millón de casos.

No nos sorprende gran cosa que la investigación revele la existencia de un fuerte vínculo entre el maltrato físico, sexual y emocional de los niños y el desarrollo de problemas psiquiátricos. Pero a comienzos de la década de 1990 los profesionales de la salud mental creían que las dificultades emocionales y sociales eran de origen psicológico. Se pensaba entonces que el maltrato en la infancia, o bien fomentaba el desarrollo de mecanismos de defensa intrapsíquicos que resultaban autodestructivos en la edad adulta, o bien detenían el de-



sarrollo psicosocial dejando un "niño herido" en el interior de la persona. Los investigadores concebían el daño básicamente como un problema de programación susceptible de ser corregido mediante terapia o simplemente borrado mediante la exhortación "¡supéralo!".

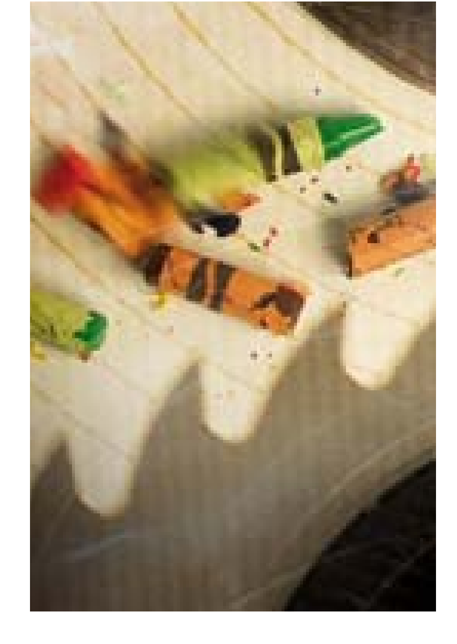
Nuevas investigaciones sobre las consecuencias del maltrato a una edad temprana, incluido el trabajo que mis colegas y yo hemos realizado en el Hospital McLean de Belmont, Massachusetts, y en la facultad de medicina de Harvard, parecen darnos una versión muy diferente. Al ocurrir el maltrato contra el niño durante el crítico tiempo de formación en que su cerebro se está esculpiendo físicamente por la experiencia, el impacto del grave estrés puede dejar una impronta indeleble en su estructura y en sus funciones. Se produce así, al parecer, una serie de efectos en cascada, moleculares y neurobiológicos, que alteran de forma irreversible el desarrollo neural.

Personalidades desquiciadas

Las secuelas de un abuso sufrido en la infancia pueden manifestarse a cualquier edad y de modos diversos. Interiormente aparecen en forma de depresión, ansiedad, pensamientos suicidas o estrés postraumático; también se exteriorizan a través de la agresividad, impulsividad, delincuencia, hiperactividad o abuso de drogas. Una de las perturbaciones psiquiátricas más desconcertantes, muy asociada al maltrato en la edad infantil, es el trastorno de la personalidad esquizoide. Esta disfunción del psiquismo se caracteriza por que quien la padece ve a los demás en términos tajantes, absolutos, de blanco o negro, con frecuencia poniendo primero a una persona sobre un pedestal y después denigrándola por haber notado en ella algún desliz o traición. Los afectados por este trastorno son también proclives a estallar en volcánicos arrebatos de cólera y a sufrir pasajeros episodios de paranoia o psicosis. Tienen un historial de relaciones intensas e inestables, se sienten vacíos o inseguros de su identidad, suelen intentar escapar de sus angustias abusando de las drogas y experimentan impulsos autodestructivos o suicidas.

En 1984, mientras trataba yo a tres sujetos que padecían el trastorno de la personalidad esquizoide, empecé a sospechar que su temprana exposición a varias formas de maltrato había alterado el desarrollo de sus sistemas límbicos. El sistema límbico es un conjunto de núcleos cerebrales interconectados (centros neurales) que desempeñan un papel fundamental en la regulación de las emociones y de la memoria. Dos regiones límbicas importantísimas son el hipocampo y la amígdala, situadas bajo la corteza en el lóbulo temporal (*véase la figura 1*). Se cree que el hipocampo tiene importancia en la formación y en la recuperación de la memoria verbal y la memoria emocional, mientras que la amígdala es la encargada de crear el contenido emocional de la memoria —por ejemplo, los sentimientos relacionados con el condicionamiento por el miedo y las reacciones agresivas.

Con mis compañeros del McLean Yutaka Ito y Carol A. Glod, pregunté si no interrumpiría el maltrato en la infancia la saludable maduración de estas regiones del cerebro. ¿Podría estimular tanto la amígdala que la pusiera en un estado de excesiva irritabilidad eléctrica, o tal vez dañaría el hipocampo en desarrollo al exponerlo demasiado a las hormonas del estrés? Nos planteamos también si los daños del hipocampo o la sobreexcitación de la amígdala no producirían síntomas similares a los experimentados por los pacientes con epilepsia del lóbulo temporal (ELT), que interrumpe



esporádicamente el funcionamiento de estos núcleos cerebrales. Durante los ataques de ELT, los enfermos permanecen conscientes mientras experimentan varios síntomas psicomotores provocados por las tormentas eléctricas que se producen en dichas regiones. Entre los efectos concomitantes se incluyen la aparición brusca de sensaciones de hormigueo, entumecimiento o vértigo, manifestaciones motrices (fijaciones de la mirada o espasmos incontrolables) y síntomas autónomos (ruborizarse, tener náuseas o una sensación de 'encogimiento del estómago' parecida a la que se siente en un ascensor que sube muy deprisa). La ELT puede también causar alucinaciones o ilusiones en cualquiera de los cinco sentidos. No es raro, por ejemplo, que quien padece este mal experimente distorsiones de los tamaños o formas de los objetos, como Alicia en el País de las Maravillas. Son asimismo comunes las sensaciones de desconexión del *déjà vu* y de la disociación de cuerpo y mente.

Resumen/Maltrato a los niños

- Hasta hace poco los psicólogos creían que los maltratos inferidos durante la infancia se limitaban a detener el desarrollo de los mecanismos psíquicos de autodefensa y la adaptación psicosocial de los adultos. Pero con las nuevas técnicas de formación de imágenes que registran la actividad cerebral y otros experimentos se ha evidenciado que pueden causar un daño permanente en la estructura neural y en el funcionamiento de un cerebro todavía en período de desarrollo.
- La gravedad de las consecuencias apunta a que hemos de esforzarnos mucho más en evitar maltratos, abandonos y abusos antes de que dañen irreparablemente a millones de pequeñas víctimas. También puede que convenga adoptar nuevos enfoques terapéuticos.

Los maltratos causan alteraciones en el cerebro

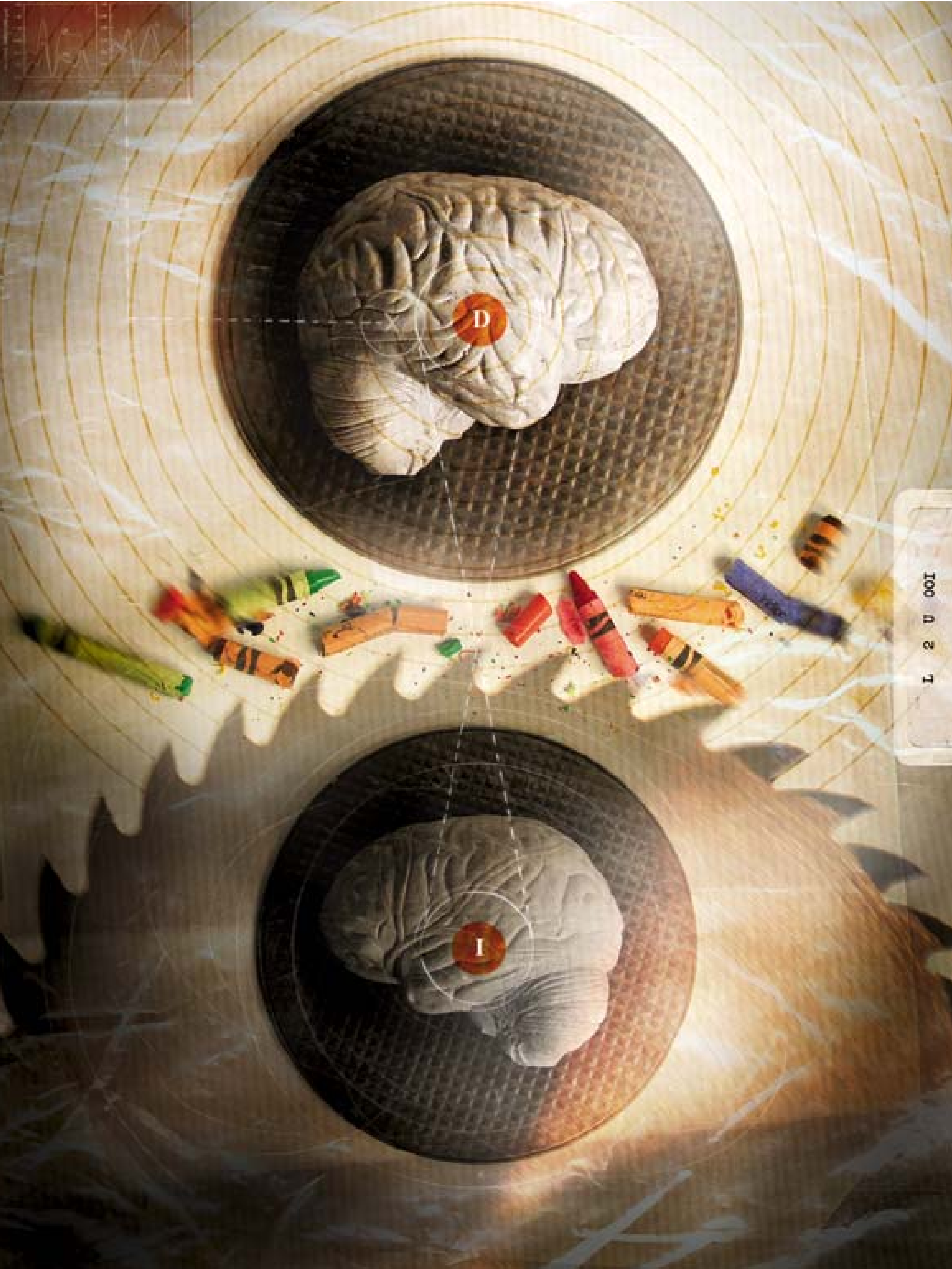
Para explorar la relación entre los malos tratos a corta edad y la disfunción del sistema límbico, ideé en 1984 una lista de preguntas encaminadas a averiguar la frecuencia con que los pacientes de ELT experimentan los referidos síntomas. En 1993, mis colaboradores y yo fuimos anotando los resultados de 253 adultos que acudieron en busca de diagnóstico a un centro de atención psiquiátrica para pacientes externos. Poco más de la mitad dijo haber sufrido en la niñez malos tratos físicos, abusos sexuales o ambas cosas. Comparados con pacientes que no habían sido objeto de ningún tipo de maltrato, los promedios de puntuación en las listas fueron un 38 % más altos en el caso de los pacientes físicamente maltratados (pero que no habían sufrido abusos sexuales) y un 49 % en el de quienes habían padecido abusos sexuales (pero no malos tratos físicos de otro tipo). Los pacientes que declararon haber sufrido malos tratos físicos y sexuales tuvieron un promedio de puntuaciones un 113 % más alto que los que dijeron no haber sufrido ningún tipo de violencia. El maltrato antes de los 18 años de edad afectaba más que el inferido más tarde, y el efecto era similar en hombres y mujeres.

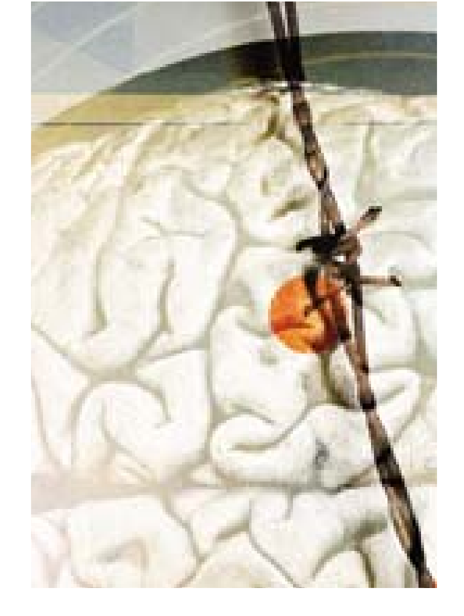
En 1994 nuestro equipo de investigadores del McLean trató de averiguar si había alguna relación entre los malos tratos, físicos o psicológicos, o los abusos sexuales inferidos a los niños, y las anomalías de las ondas cerebrales observables en los electroencefalogramas (EEG), que proporcionan una medida de la irritabilidad límbica más directa que nuestra lista de preguntas. En busca de algún nexo, repasamos los registros de 115 ingresos consecutivos en un hospital psiquiátrico para niños y adolescentes. Encontramos anomalías clínicamente significativas en las ondas cerebrales de un 54 % de los pacientes con un historial de traumas a edad temprana y sólo en las de un 27 % de los que no habían sufrido ningún tipo de agresión. Observamos anomalías en los EEG del 72 % de quienes habían sufrido graves maltratos físicos y abusos sexuales. Las irregularidades surgían en las regiones frontal y temporal del cerebro y, para sorpresa nuestra, afectaban al hemisferio izquierdo en vez de a ambos lados, como habría sido de esperar.

Nuestros hallazgos encajaban con los de un estudio hecho en 1978 con EEG de adultos que fueron víctimas de incestos. El director de aquel estudio, Robert W. Davies, de la facultad de medicina de la Universidad de Yale, y su equipo vieron que el 77 % mostraba anomalías en los EEG y el 27 % padecía ataques.

Los trabajos subsiguientes de otros investigadores, efectuados mediante la toma de imágenes por resonancia magnética (IRM), han confirmado que hay una relación entre el maltrato sufrido a corta edad y el tamaño del hipocampo en la edad adulta. También la amígdala puede ser menor de lo normal. En 1997, J. Douglas Bremner, entonces en la facultad de medicina de la Universidad de Yale, y sus colegas compararon los barridos de IRM de 17 adultos que padecieron en su infancia malos tratos físicos o sexuales y sufrían el trastorno de estrés postraumático (TEPT) con 17 sujetos sanos equiparables en edad, sexo, raza, años de educación y de abuso del alcohol, y en cuanto a si eran zurdos o diestros. El hipocampo izquierdo de los que padecieron maltratos y tenían el TEPT era, en promedio, un 12 % más pequeño que el de los sujetos sanos del grupo de control; el derecho era de tamaño normal. A nadie sorprendió, dado el importante papel del hipocampo en el funcionamiento de la memoria, que aquellos pacientes obtuvieran en los tests de memoria verbal puntuaciones más bajas que el grupo de los que no habían sufrido violencias.

1. LA CONDUCTA ANTISOCIAL resultante de maltratos sufridos en la infancia parece deberse a la sobreexcitación del sistema límbico, primitiva región del mesencéfalo que regula la memoria y las emociones. Se cree que dos pequeñas estructuras situadas en la profundidad del cerebro —el hipocampo y la amígdala— desempeñan papeles prominentes en la generación de este tipo de disfunciones interpersonales. La importancia del hipocampo estriba en que determina qué parte de la información que se recibe se guardará en la memoria a largo plazo. Compete a la amígdala filtrar e interpretar la información sensorial recibida en el contexto de lo que el individuo necesita emocionalmente y para sobrevivir, para suscitar, a continuación, las reacciones apropiadas.


D
I



En 1997, Murray B. Stein, de la Universidad de California en San Diego, halló también anomalías en el hipocampo izquierdo de 21 mujeres adultas que de niñas habían sido objeto de abusos sexuales y padecían el TEPT o el trastorno de la identidad disociativa (también llamado de personalidad múltiple, cuadro que algunos investigadores piensan es común entre las mujeres que han sufrido abusos). Stein notó que en estas mujeres el volumen de la parte izquierda del hipocampo estaba bastante reducido, mientras que la derecha no había sufrido mucho. Halló, además, una clara correspondencia entre el grado de reducción del tamaño del hipocampo y la gravedad de los síntomas de disociación de cada paciente. En 2001, el grupo de Martin Driessen, del Hospital Gilead de Bielefeld, informó de unas reducciones del 16 % del tamaño del hipocampo y un 8 % del tamaño de la amígdala en mujeres adultas con trastorno de la personalidad esquizoide y un historial de maltratos infantiles.

Por otra parte, cuando en 1999 Michael D. De Bellis y sus compañeros de la facultad de medicina de la Universidad de Pittsburgh midieron cuidadosamente las imágenes IRM de los hipocampos de 44 sujetos maltratados en la infancia y que padecían el TEPT, y las compararon con las de 61 sujetos sanos, no pudieron observar ninguna diferencia de volumen.

Susan Andersen y Ann Polcari, compañeras mías en el McLean, y yo obtuvimos similares resultados en nuestro recién terminado análisis volumétrico de los hipocampos de 18 individuos adultos jóvenes (de edades comprendidas entre los 18 y los 22 años) con un historial de repetidas violaciones acompañadas de miedo o terror, a las que comparamos con un control de 19 sujetos sanos de las mismas edades. A diferencia de lo que se había hecho en anteriores estudios, los sujetos del control no eran pacientes, sino gente de la calle que tenía menos problemas de salud mental. No observamos diferencias de volumen en los hipocampos. Pero sí hallamos, como el grupo de Driessen, un 9,8 % de reducción media del tamaño de la parte izquierda de la amígdala, correlacionado con sentimientos de depresión e irritabilidad u hostilidad. Nos preguntamos por qué el hipocampo era menor en los sujetos pertenecientes a los grupos de Bremner, Stein y Driessen y de tamaño normal en los estudiados por De Bellis y nosotros mismos. De las varias respuestas posibles, la más verosímil es que el influjo del estrés sobre el hipocampo sea sólo muy gradual, con lo que sus efectos perjudiciales no se discernirían en la anatomía hasta que el sujeto no tuviese ya cierta edad.

Por otro lado, los estudios con animales de Bruce S. McEwen, de la Universidad Rockefeller, y de Robert M. Sapolsky, de la Universidad de Stanford, habían demostrado ya que el hipocampo es muy vulnerable a las acometidas del estrés. No sólo es especialmente vulnerable por la lentitud de su desarrollo, sino que es también una de las pocas regiones del cerebro donde siguen apareciendo nuevas neuronas después del nacimiento. Añádase que tiene mayor densidad de receptores del cortisol, la hormona del estrés, que casi cualquier otra área del cerebro. La exposición a las hormonas del estrés puede cambiar en proporción significativa la forma de las neuronas más grandes del hipocampo, e incluso puede matarlas. El estrés suprime también la producción de nuevas células granulares (pequeñas neuronas), que en condiciones normales continúan desarrollándose después del nacimiento.

Experimentos con ratas hechos por Christian Caldji y Michael J. Meaney, de la Universidad McGill, y por Paul M. Plotsky, de la Universidad Emory, han demostrado que el estrés a corta edad reconfigura la organización molecular de esas regiones. Una de las consecuencias más graves es la alteración en la amígdala de la estructura proteínica de las subunidades de los receptores GABA, o ácido gammaminobutírico, el neurotransmisor inhibidor primario del cerebro que atenúa la excitabilidad eléctrica de las neuronas (*véase la figura 2*). Un funcionamiento mermado de ese neurotransmisor produce una actividad eléctrica excesiva y puede desencadenar ataques. Este descubrimiento proporciona una elegante explicación molecular de nuestros hallazgos de anomalías en los EEG y de irritabilidad límbica en pacientes maltratados en la niñez.

Problemas del hemisferio cerebral izquierdo

El efecto en el sistema límbico era la consecuencia a esperar de los traumas infantiles. Pero no dejaba de intrigarnos nuestra anterior observación de que el maltrato estaba relacionado con anomalías en los EEG del hemisferio izquierdo. Esto nos movió a examinar los efectos del maltrato en el desarrollo de los hemisferios izquierdo y derecho. Decidimos recurrir a la coherencia de EEG, un refinado método de análisis cuantitativo que informa de la microestructura del cerebro —sus conexiones y circuitos eléctricos—; el EEG común, en cambio, revela cómo desempeña el cerebro sus funciones. La coherencia de EEG cumple su cometido generando una

El autor

MARTIN H. TEICHER, profesor de psiquiatría de la facultad de medicina de Harvard, dirige el Programa de Investigaciones sobre Biopsiquiatría del Desarrollo en el Hospital McLean de Belmont.

medida matemática del grado de correlación recíproca entre las complejas interconexiones neuronales de la corteza, que procesa y modifica las señales eléctricas del cerebro. En general, unos niveles anormalmente altos de coherencia de EEG son prueba de un disminuido desarrollo de esos intercambios neuronales.

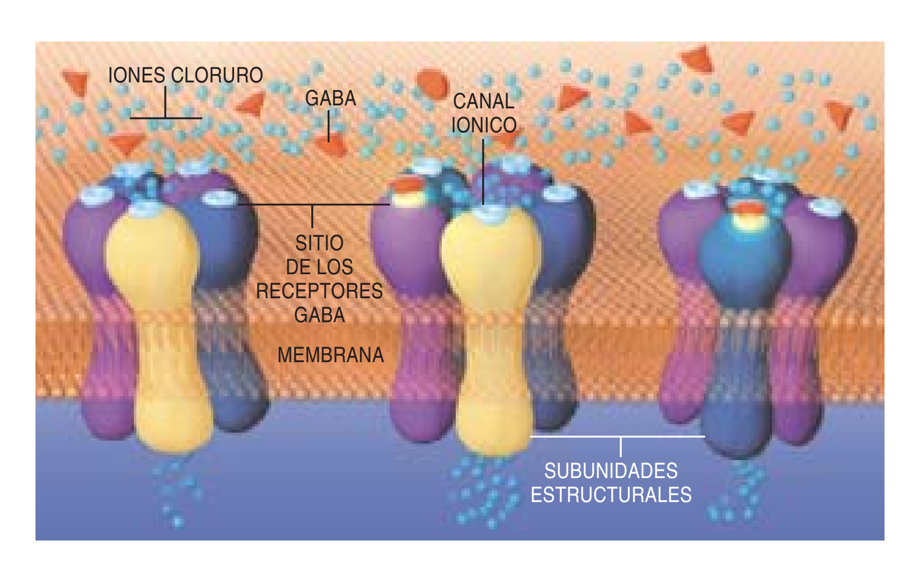
Nuestro equipo de investigación se valió de esta técnica en 1997 para comparar a 15 voluntarios sanos con 15 niños y adolescentes con enfermedades psiquiátricas que tenían una confirmada historia de malos tratos físicos o abusos sexuales graves. Las medidas de la coherencia mostraron que las cortezas izquierdas de los sujetos sanos del control estaban más desarrolladas que las derechas, resultado éste que concuerda con lo que se sabe de la anatomía del hemisferio dominante (en las personas diestras tiende a serlo la corteza izquierda). En cambio, los pacientes que habían sido maltratados estaban notoriamente más desarrollados en la corteza derecha que en la izquierda, aunque, siendo todos diestros, dominaba en ellos la corteza izquierda. Los hemisferios derechos de estos pacientes se habían desarrollado tanto como los hemisferios derechos de los sujetos del control, pero los hemisferios izquierdos de aquéllos se habían quedado muy por detrás de los de éstos. Este anómalo resultado se ponía de manifiesto con independencia de cuál fuera la diagnosis básica del paciente. Y aunque el efecto se extendía por todo el hemisferio izquierdo, las más afectadas eran las regiones temporales, lo cual corroboraba nuestra hipótesis original.

El hemisferio izquierdo está especializado en percibir y expresar el lenguaje, el derecho en procesar la información espacial y en procesar y expresar las emociones —sobre todo las negativas—. Nos habíamos preguntado si los niños maltratados almacenaban sus recuerdos perturbadores en el hemisferio derecho y si activaban con preferencia éste al rememorarlos.

Para poner a prueba esta hipótesis, Fred Schiffer midió en mi laboratorio del McLean, en 1995, la actividad hemisférica de un grupo de adultos mientras rememoraban un recuerdo neutro y uno perturbador de la infancia. Resultó que quienes tenían un historial de maltratos activaban sobre todo el hemisferio izquierdo cuando evocaban recuerdos neutros y el derecho cuando les tocaba a los dolorosos de su niñez. Los sujetos del grupo de control usaban ambos hemisferios en grado comparable tanto para una como para otra recordación; da esto a entender que había en sus reacciones una integración mayor entre los dos hemisferios.

Como la investigación de Schiffer indicaba que el trauma infantil tenía que ver con una integración disminuida de los dos hemisferios cerebrales, decidimos indagar si había alguna deficiencia en la ruta primaria para el intercambio de información entre los dos hemisferios, el cuerpo calloso. Andersen y yo colaboramos en 1997 con Jay Gield, del Instituto Nacional de la Salud Mental de Estados Unidos, en la búsqueda de ese supuesto efecto. Encontramos que en muchachos que habían sufrido malos tratos o abandono la zona media del cuerpo calloso era menor que en los sujetos de los grupos de control. Más aún, en los muchachos el efecto producido por el abandono era mucho mayor que el de cualquier otra clase de maltrato. En cambio, en las muchachas era un factor más poderoso el abuso sexual, asociado a una gran reducción del tamaño de las partes medias del cuerpo calloso. De Bellis repitió y amplió estos resultados en 1999. Los efectos de experiencias tempranas en el desarrollo del cuerpo calloso han sido confirmados por las investigaciones con primates de Mara M. Sánchez, de la Universidad Emory.

Nuestro último hallazgo tuvo sus raíces en los estudios, que abrieron caminos nuevos, de Harry F. Harlow, de la Universidad de Wisconsin-Madison. En el decenio de 1950 comparó unos monos criados por sus madres con otros criados mediante madres artificiales de alambre y felpa. Los criados por éstas eran, llegados al estado adulto, perturbadores sociales y muy agresivos. W. A. Mason, del Centro de Primates Delta, en Luisiana, que trabajaba con Harlow, descubrió que esas diferencias eran menos marcadas si a la madre artificial se la



2. MENOS INHIBICIONES: El estrés origina cambios en los receptores postsinápticos normales (*izquierda*) del ácido gammaminobutírico (GABA), que en el sistema nervioso central es el neurotransmisor inhibidor más importante. Esto puede llevar a una estimulación neural excesiva que dé por resultado una irritabilidad del sistema límbico. La presencia del GABA aminora la excitabilidad eléctrica de las neuronas porque posibilita un mayor flujo de iones cloruro (*centro*). La pérdida de una de las subunidades estructurales clave del receptor GABA disminuye su capacidad de moderar la actividad neural (*derecha*).



balanceaba. J. W. Prescott, del Instituto Nacional de Sanidad Infantil y Desarrollo Humano, supuso que ese movimiento de balanceo se transmitiría al cerebelo, sobre todo a su parte media, el vermis cerebelar, situado en la zona posterior del cerebro, justo encima del tronco encefálico. Entre otras funciones, el vermis modula los núcleos del tronco que controlan la producción y secreción de los neurotransmisores norepinefrina y dopamina. Como el hipocampo, esta parte del cerebro se desarrolla gradualmente y sigue creando neuronas después del nacimiento. Su densidad de receptores de las hormonas del estrés es mayor aún que la del hipocampo, por lo que estar expuesto a dichas hormonas puede afectar mucho a su desarrollo.

Recientemente se ha comunicado que las anomalías del vermis cerebelar tienen que ver con varias dolencias psiquiátricas, entre ellas la enfermedad maniacodepresiva, la esquizofrenia, el autismo y el trastorno de hiperactividad/déficit de la atención. Estos morbos se derivan de factores genéticos y prenatales, no de maltratos en la infancia, pero que las anomalías del vermis parezcan estar en el centro de tantas enfermedades psiquiátricas da a entender que esta región desempeña un papel crítico en la salud mental.

La mala regulación de los neurotransmisores norepinefrina y dopamina controlados por el vermis puede producir síntomas de depresión, psicosis, hiperactividad y mengua de la atención. La activación del sistema de la dopamina se ha asociado al paso a un estado de la atención que tiende a depender más del hemisferio izquierdo (el verbal), mientras que la del sistema de la norepinefrina hace que se pase a un estado dirigido sobre todo por el hemisferio derecho (el emocional). Quizá lo más curioso sea que el vermis contribuye también a regular la actividad eléctrica en el sistema límbico; la estimulación del vermis puede suprimir la actividad de los ataques en el hipocampo y en la amígdala.

R. G. Heath, que trabajaba en el decenio de 1950 en la Universidad Tulane, halló que los monos de Harlow tenían focos de ataques en sus núcleos fastigiales y en el hipocampo. Más tarde, descubriría, al investigar a seres humanos, que la estimulación eléctrica del vermis reducía la frecuencia de los ataques y favorecía la salud mental en un corto número de pacientes con trastornos neuropsiquiátricos sin remedio farmacológico conocido. Este resultado nos indujo a pensar si no producirían los malos tratos en la infancia anomalías en el vermis cerebelar que contribuyesen a que se dieran síntomas psiquiátricos, irritabilidad límbica y una gradual degeneración del hipocampo.

Para empezar a someter a prueba estas hipótesis, Carl M. Anderson colaboró con Perry Renshaw y conmigo en el Centro de Radiología Cerebral del McLean. Anderson empleó métodos basados en la relaxometría T2, una nueva técnica de representación en imágenes del funcionamiento cerebral basada en la IRM que hemos desarrollado nosotros mismos. Por primera vez pudimos ir comprobando, sin emplear trazadores radiactivos ni otros contrastes, cómo fluía la sangre por las regiones del cerebro en estado de reposo.

Cuando el cerebro está en reposo, la actividad neuronal de una región corresponde casi con exactitud al total de sangre que recibe para mantener su actividad. Anderson halló que había una notable correlación entre la actividad del vermis cerebelar y el grado de irritabilidad límbica indicado por las respuestas que a mi cuestionario relativo a la ELT daban las personas jóvenes, adultas y sanas del grupo de control, y las del grupo experimental, jóvenes adultas también, que tenían un historial de repetidos abusos sexuales.

Ahora bien, fuera cual fuera el nivel de la sintomatología límbica, el total de sangre fluyente en el vermis era claramente menor en quienes tenían un historial de traumas. Ese escaso flujo sanguíneo parece apuntar, pues, a algún deterioro funcional en la actividad del vermis cerebral. Los que habían padecido malos tratos tenían, por término medio, puntuaciones más altas en el cuestionario; por una razón probable: su vermis no podía activarse lo bastante como para aplacar unos niveles más altos de irritabilidad límbica.

El conjunto de estas averiguaciones apunta una interesante explicación del trastorno de la personalidad esquizoide. La reducida integración de los hemisferios derecho e izquierdo y el menor tamaño del cuerpo calloso quizá predispongan a estos pacientes a pasar de un modo brusco de un estado dominado por un hemisferio a uno dominado por el otro, con percepciones emocionales y recuerdos muy diferentes. Esa polarización del dominio hemisférico podría ser la razón de que los sujetos vean a sus amigos, familiares y colaboradores de la más positiva de las maneras cuando se hallan en un estado y de un modo más que negativo cuando saltan al otro; precisamente ésa es la característica distintiva del trastorno. Más aún, la irritabilidad eléctrica límbica puede producir síntomas de agresividad, exasperación y ansiedad. Suele observarse también una actividad electroencefalográfica anormal del lóbulo temporal en personas proclives al suicidio o de comportamiento autodestructivo.

El detrimento adaptativo

Nuestro equipo inició esta investigación con la hipótesis de que el estrés a una edad temprana era un agente tóxico que dificultaba el progreso normal y ordenado del cerebro; estrés precoz

que originaba problemas psiquiátricos permanentes. Frank W. Putnam, del Hospital Pediátrico de Cincinnati, y Bruce D. Perry, del Comité de Salud Mental de Alberta, han postulado la misma hipótesis. Sin embargo, he acabado por valorar de otra forma la suposición de que partimos. Los cerebros humanos evolucionaron para que los moldease la experiencia. Las dificultades a corta edad fueron cosa corriente a lo largo de nuestro desarrollo ancestral. ¿Vamos a creer que el cerebro en desarrollo nunca evolucionó para hacer frente a la rudeza y, por ende, que sufre daños de manera no adaptativa? Esto parece sumamente improbable. Lo lógico es que la exposición temprana al estrés produzca efectos moleculares y neurobiológicos que alteren el desarrollo neural de una manera adaptativa, que dejará preparado al cerebro adulto para sobrevivir y reproducirse en un mundo lleno de riesgos.

¿Qué características o capacidades serían beneficiosas para la supervivencia en las duras condiciones de los primeros tiempos? Algunas de las más obvias son las necesarias para movilizar una fuerte reacción de lucha o huida, para reaccionar agresivamente, sin tardanzas ni titubeos, a los desafíos, para mantenerse muy alerta ante el peligro y para que haya vigorosas reacciones de estrés que faciliten la recuperación de las heridas. En este sentido, podríamos redescribir los cambios cerebrales que hemos observado como adaptaciones a un entorno adverso.

Tal estado adaptativo ayuda a que el individuo afectado se mantenga a salvo durante los años reproductivos (y hasta es probable que aumente la promiscuidad sexual), lo que es de suma importancia para el éxito evolutivo, pero se paga un alto precio por ello. Hace poco, McEwen ha contemplado la posibilidad de que la hiperactivación de los sistemas de reacción a los estímulos, tal vez necesaria para la supervivencia a corto plazo, aumente los riesgos de obesidad, diabetes del tipo II e hipertensión, origine múltiples problemas psiquiátricos, incluido un alto riesgo de suicidio, y acelere el envejecimiento y la degeneración de algunas estructuras cerebrales, entre ellas el hipocampo.

Nosotros proponemos la hipótesis de que una crianza adecuada y la ausencia de fuertes tensiones nerviosas en los primeros años de la vida permiten a nuestros cerebros desarrollarse de manera menos agresiva y más estable emocionalmente, más social y más empática, con una mayor integración de los hemisferios. Creemos que este proceso nos hace más aptos para construir estructuras interpersonales de mayor complejidad y capacita a los seres humanos para aprovechar mejor su potencial creativo.

La sociedad cosecha lo que siembra en la crianza de sus hijos. El estrés esculpe el cerebro de manera que exhiba una diversidad de comportamientos antisociales, aunque adaptativos. Ya venga en forma de trauma físico, emocional o sexual, o a causa de la exposición a la guerra, al hambre o a las pestes, el estrés puede engendrar una oleada de cambios hormonales que forjan en el cerebro conexiones permanentes encaminadas a enfrentarse a un mundo hostil. Por medio de esa cadena de eventos, la violencia y el maltrato van pasando de generación a generación, así como de una sociedad a la siguiente. Nuestra rotunda conclusión es que es necesario que se haga mucho más por asegurar que la infancia no sufra maltratos, ante todo porque, una vez se producen en el cerebro esas alteraciones clave, quizá no se pueda ya dar marcha atrás.

Bibliografía complementaria

DEVELOPMENTAL TRAUMATOLOGY, PART 2: BRAIN DEVELOPMENT. M. D. De Bellis, M. S. Keshavan, D. B. Clark, B. J. Casey, J. N. Giedd, A. M. Boring, K. Frustaci y N. D. Ryan, en *Biological Psychiatry*, vol. 45, n.º 10, págs. 1271-1284; 15 de mayo, 1999.

WOUNDS THAT TIME WON'T HEAL: THE NEUROBIOLOGY OF CHILD ABUSE. Martin H. Teicher en *Cerebrum* (Dana Press), vol. 2, n.º 4, págs. 50-67; otoño 2000.

El computador mundial

Un sistema operativo que cubriese la Internet entera nos brindaría la potencia de los millones de ordenadores personales conectados a ella

David P. Anderson y John Kubiatowicz

Cuando Carmen vuelve del trabajo y va a mirar si tiene correo electrónico, no está inactivo su ordenador personal: compara secuencias de genes con una biblioteca de moléculas de proteínas para una empresa biotécnica mientras su conexión DSL descarga un bloque de datos radioastronómicos que se analizarán después. El disco, además de los ficheros de Carmen, contiene fragmentos cifrados de miles de otros ficheros. De vez en cuando se lee y transmite uno de ellos; es una parte de una película que está viendo alguien en Helsinki. Al mover Carmen el ratón esta actividad cesa bruscamente; a partir de ese momento el ordenador y su conexión a la red son sólo suyos.

Este compartir recursos no se detiene en su ordenador fijo. El portátil que lleva en el bolso está desconectado, pero guarda en el disco trozos de ficheros de otras personas: forma parte de un sistema distribuido de copias de seguridad. Del mismo modo, los ficheros más importantes de Carmen tienen copias de seguridad repartidas por docenas de discos diseminados por el mundo.

Carmen paga luego por ver una película independiente en su televisión digital conectada a Internet. La película se recompone a partir de fragmentos archivados en cientos de ordenadores ajenos.

Los ordenadores de Carmen están pluriempleados con otras gentes. Pero no regalan nada; a medida que trabajan el dinero afluye a la cuenta bancaria virtual de Carmen. Los pagos vienen de la empresa biotécnica, del sistema cinematográfico y del servicio de copias de seguridad. En lugar de adquirir costosos "parques de servidores", estas compañías alquilan tiempo y espacio, no sólo en los dos ordenadores de Carmen, sino también en millones de ordenadores más. De este modo todos salen ganando. Las empresas ahorran en equipos, gracias a lo cual el servicio de cine puede ofrecer películas poco conocidas. Carmen gana algo de dinero, sus ficheros tienen copias de seguridad y consigue ver una película rara. Todo esto sería posible con un sistema operativo a escala de Internet (o, según sus siglas en inglés, ISOS) que proporcione el "engrudo" necesario para aglutinar las capacidades de procesamiento y almacenamiento de millones de ordenadores independientes.

Aplicaciones a escala de Internet

Aunque el mundo de Carmen sea imaginario —todavía no existe un sistema operativo a escala de Internet—, sí que se ha logrado desarrollar unas cuantas aplicaciones que actúan a lo largo y ancho de la Red —aplicaciones "de igual a igual" (*peer-to-peer*)— e intentan aprovechar el ingente con-

Los autores

DAVID P. ANDERSON y JOHN KUBIATOWICZ están asociados a la Universidad de California en Berkeley. Anderson perteneció al departamento de informática desde 1985 a 1991. Actualmente dirige el proyecto SETI@home y es científico jefe de United Devices, proveedor de los programas de computación distribuida que participa en el proyecto distributed.net. Kubiatowicz, profesor adjunto de informática en Berkeley, es arquitecto jefe de OceanStore, sistema de almacenamiento distribuido en desarrollo que tiene muchas de las propiedades que requiere un ISOS.


Parallel Processing
Internal OS

junto de máquinas infrautilizadas que están conectadas a ella (*véase el recuadro* "Sistemas distribuidos existentes"). Estas aplicaciones consiguen objetivos que serían difíciles, inasequibles o imposibles de alcanzar por medio de ordenadores de uso exclusivo. Es más, los sistemas actuales no son sino el principio: cabe imaginar servicios de archivo que sean fiables durante cientos de años y motores de búsqueda inteligentes para la Red semántica del mañana [*véase* "La Red semántica", de Tim Berners-Lee, James Hendler y Ora Lassila; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2001].

Por desgracia, la creación de aplicaciones a escala de Internet sigue siendo un problema colosal. El desarrollo de cada aplicación nueva debe partir de lo más básico; hay que dedicar buena parte del trabajo a cuestiones técnicas, el mantenimiento de una base de datos de los usuarios, por ejemplo, que tienen poco que ver con las aplicaciones en sí. Si se quiere que éstas lleguen a ser de uso común habrá que abordar de una vez por todas los aspectos infraestructurales.

Para no duplicar esfuerzos podemos inspirarnos en sistemas operativos como el Unix y el Windows de Microsoft. En el entorno informático virtual que ofrece un sistema operativo los programas operan como si fuese suyo el ordenador. Los programadores se libran de tener que vérselas con los enojosos detalles de la asignación de memoria y de disco, con los protocolos de comunicación, con la planificación de infinidad de procesos y con las interfaces de los periféricos de entrada y salida de datos. Un sistema operativo simplifica así enormemente el desarrollo de nuevos programas informáticos. De modo análogo, con un sistema operativo que trabaje a escala de Internet será mucho más fácil concebir nuevas aplicaciones distribuidas.

Un ISOS se compone de una delgada "capa" (*layer*) de programación —es decir, un nivel de la red donde los programas se comunican entre sí con un mismo protocolo, en este caso mediante un agente

Sistemas distribuidos existentes

COMPUTACION

GIMPS (La Gran Búsqueda de Números Primos de Mersenne por Internet): www.mersenne.org/
Busca números primos muy grandes. Se han apuntado unas 130.000 personas y ha encontrado cinco nuevos números primos, entre ellos el mayor conocido, de cuatro millones de cifras.

distributed.net: www.distributed.net/
Ha descifrado varios mensajes buscando por medio de la fuerza bruta a lo largo y ancho de todo el universo de claves de cifrado posibles. En el proyecto actual se prueban más de 150.000 millones de claves por segundo. Asimismo, busca las "graduaciones óptimas de Golomb", conjuntos de números que tienen aplicación en codificación y comunicaciones.

SETI@home (Búsqueda de inteligencia extraterrestre): http://setiathome.berkeley.edu/
Analiza datos de los radiotelescopios en busca de señales de origen extraterrestre. En total, 3.400.000 usuarios han dedicado a esta tarea más de 800.000 años de tiempo de procesador.

folding@home: http://folding.stanford.edu/
Dirigido por el grupo de Vijay Pande, del departamento de química de la Universidad de Stanford, este proyecto utiliza unos 20.000 ordenadores para la simulación molecular dinámica del plegamiento de proteínas, entre ellas la beta-amiloide del Alzheimer.

Proyecto de investigación sobre el cáncer de Intel/United Devices: http://members.ud.com/projects/cancer/
Investiga posibles fármacos contra el cáncer probando entre 3500 millones de moléculas cuáles son las mejor conformadas para ligarse a cualquiera de las ocho proteínas que necesita el tumor para su desarrollo.

ALMACENAMIENTO

Napster: www.napster.com/
Permitía a los usuarios compartir música digital: una base de datos central almacenaba las localizaciones de todos los ficheros, pero los datos se transferían directamente entre los sistemas de los usuarios. Tras una querella de los autores y editores musicales contra Napster, se logró un acuerdo por el cual éste adquiriría derechos sobre la música y se pagaría a los artistas, pero el nuevo servicio, ahora con tarifas, no se ha puesto aún en marcha.

Gnutella:www.gnutella.com/
Proporciona un sistema reservado y seguro de ficheros compartidos. No existe servidor central; en su lugar la petición de ficheros pasa de cada ordenador a todos sus vecinos.

Freenet: http://freenetproject.org/
Ofrece un servicio semejante al Gnutella, pero con un protocolo de localización de ficheros mejor. Está concebido para mantener en el anonimato a quienes solicitan ficheros y a quienes los suministran; dificulta que el propietario de un anfitrión determine qué ficheros Freenet almacena su ordenador o que se le pueda hacer responsable de su contenido.

Mojo Nation: www.mojonation.net/
También se parece a Gnutella, pero los ficheros se descomponen en pequeños fragmentos que se almacenan en ordenadores diferentes para mejorar la velocidad a que pueden descargarse datos a la red. Un sistema de pago virtual estimula la provisión de recursos por los usuarios.

Fasttrack P2P Stack: www.fasttrack.nu/
Es un sistema "de igual a igual" donde unos ordenadores de mayor potencia se convierten en centros de búsqueda cuando se necesita. Con este software se prestan los servicios Grokster, MusicCity ("Morpheus") y KaZaA de ficheros compartidos.

del ISOS que se ejecuta en cada ordenador “anfitrión” (*host*), el de Carmen, por ejemplo— y un sistema central coordinador que se ejecuta en uno o varios complejos de servidores del ISOS. Esa nueva capa de programación sólo proporcionaría las funciones esenciales de asignación y planificación de los recursos para cada tarea; controlaría la comunicación entre los ordenadores anfitriones y determinaría el importe que ha de pagarse a cada máquina. Un sistema operativo de este tipo, o “micronúcleo” (*microkernel*), relega las funciones de nivel superior a programas que hacen uso del sistema pero no forman parte de él. Por ejemplo, Carmen no utilizaría directamente el ISOS para salvaguardar sus ficheros en fragmentos diseminados por la Internet, sino que ejecutaría una aplicación que se encargaría de la tarea; para hacerlo recurriría, eso sí, a funciones del ISOS. Para repartir los recursos informáticos entre los diferentes usuarios con imparcialidad y eficacia, así como para retribuir a los propietarios de tales recursos, el ISOS se valdría de principios sacados de la teoría económica.

A dos grandes tipos de aplicaciones les convendría utilizar un ISOS. El primero es el procesamiento distribuido de datos: simulaciones físicas, análisis de las señales radioeléctricas, análisis genéticos, presentación informatizada de gráficos y elaboración de modelos financieros. En el segundo se incluyen los servicios “en línea” distribuidos: sistemas de almacenamiento de ficheros, bases de datos, la provisión de anfitriones de sitios de la Telaraña Mundial, motores de búsqueda avanzados en ésta y conexiones a medios de comunicación, o a un servicio de vídeo por Internet, que se van ejecutando sin tener que esperar a que se complete la descarga (*streaming*).

Lo mío es tuyo

La computación funciona hoy, en su mayor parte, como recurso de carácter privado: las organizaciones y los particulares son propietarios de los sistemas que utilizan. Un ISOS facilitaría una nueva manera de obrar en la que sería corriente el uso por todos de cualquier recurso de Internet. Los recursos —los ordenadores capaces de procesar o almacenar los datos y las redes que transfieren éstos entre aquéllos— seguirían siendo de propiedad individual, pero los utilizaría cualquiera. Los ordenadores podrían ser ordenadores personales fijos, portátiles, servidores, dispositivos de almacenamiento conectados a la red y tal vez hasta aparatos de bolsillo.

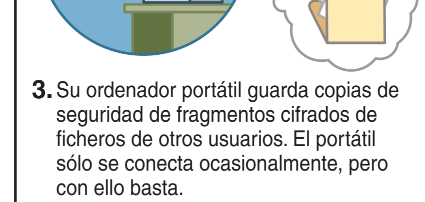
El fondo de recursos de Internet difiere de los privados en varios aspectos importantes. Más de 150 millones de ordenadores están conectados a Internet, y su número crece exponencialmente. En consecuencia, un ISOS proporcionaría un computador virtual que multiplicaría en principio por 150 millones la velocidad de procesamiento y la capacidad de memoria de un solo ordenador ordinario. Aun cuando este computador virtual estaría compartido entre muchos y se le impondría la carga adicional de explotar la red, el usuario dispondría de un ordenador mayor, más rápido y económico que los que él pudiese poseer. La continua mejora de los equipos del fondo de recursos haría que la velocidad y capacidad total de este supercomputador creciese aún más deprisa que el nú-

ORDENADORES PLURIEMPLEADOS

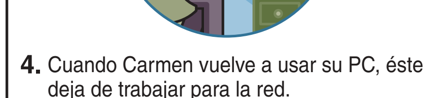
Gracias a las aplicaciones extendidas a Internet los ordenadores personales (PC) de todo el mundo pueden trabajar en períodos en los que acostumbran estar fuera de servicio. El proceso es el siguiente:

1. Un sistema operativo a escala de Internet (ISOS) coordina todos los ordenadores participantes y retribuye su trabajo.

2. El ordenador fijo de Carmen trabaja mientras ella está fuera de casa. Es uno de los millones de PC que procesan datos y reparten fragmentos de ficheros por la red.

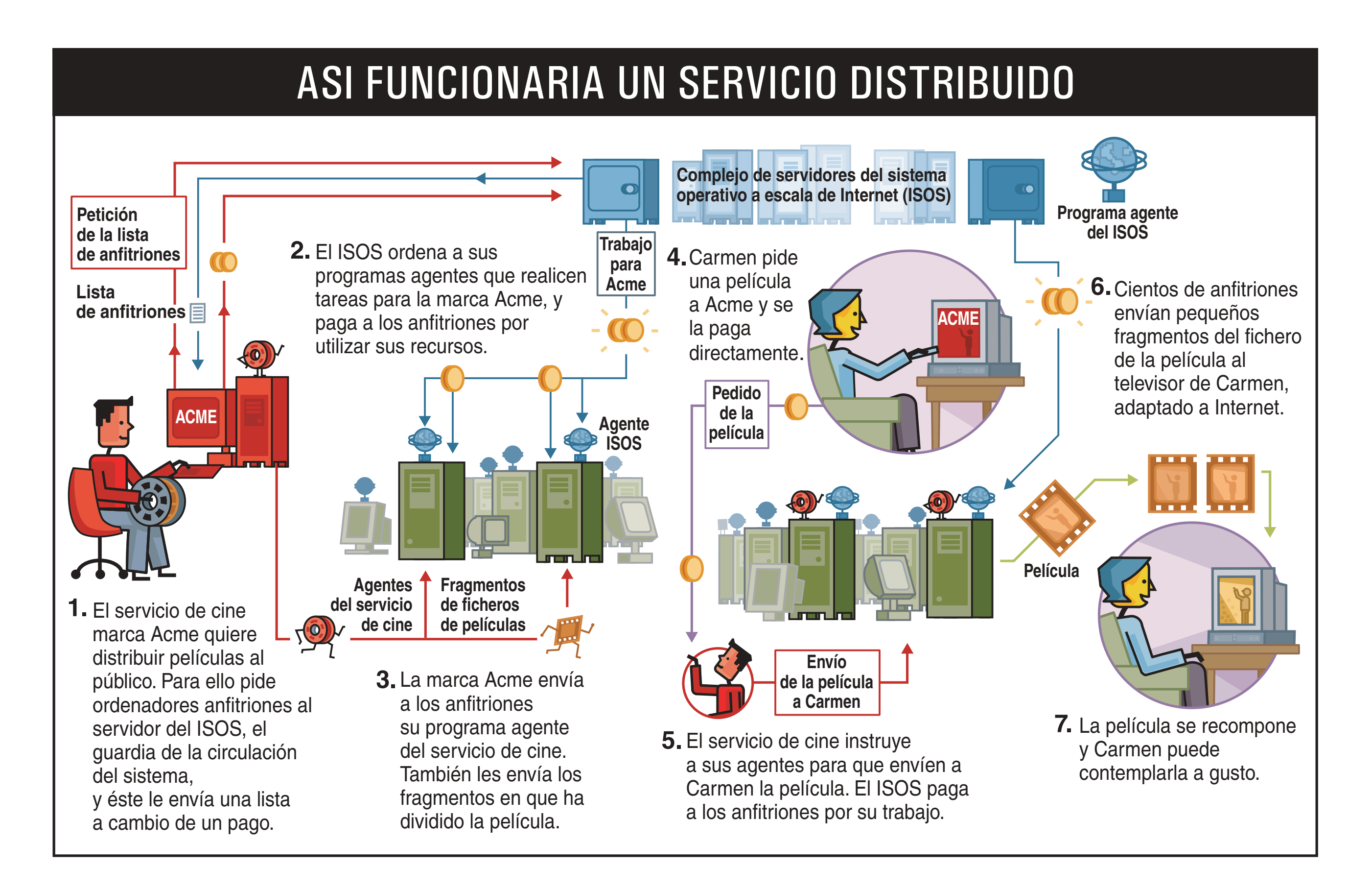


3. Su ordenador portátil guarda copias de seguridad de fragmentos cifrados de ficheros de otros usuarios. El portátil sólo se conecta ocasionalmente, pero con ello basta.



4. Cuando Carmen vuelve a usar su PC, éste deja de trabajar para la red.

5. Más tarde, Carmen ve una película reconstruida a partir de fragmentos de fichero entregados por la red.



mero de ordenadores conectados. Además, el fondo se mantiene a sí mismo: cuando un ordenador se avería, su propietario lo repara o lo sustituye por otro.

El fondo de Internet ofrece la posibilidad de una extraordinaria transmisión de datos en paralelo. Por ejemplo, la película que pide Carmen podría descargarse en fragmentos que provengan de 200 anfitriones. Cada uno de ellos tal vez sea un ordenador personal conectado a Internet por un anticuado módem de 56k —demasiado lento para presentar un vídeo de alta calidad—, pero todos combinados podrían transmitir a 10 megabit por segundo, mejor que un módem de cable. Los datos almacenados en un sistema distribuido están al alcance desde cualquier lugar (con las medidas de seguridad adecuadas) y sobreviven a desastres que inhabiliten secciones del fondo de recursos. En cuanto a la seguridad, es grande cuando no es posible atentar contra un sistema si no se violan, digamos, 10.000 ordenadores.

Así, esta manera nueva de obrar, que echa mano de todos los recursos de Internet, ensancha las fronteras de lo posible —velocidades superiores o mayores bloques de datos— en algunas aplicaciones, al tiempo que reduce los costes en otras. Pero hay aplicaciones en las que ninguna de las dos facetas mejora: es sólo un paradigma nuevo, no una panacea. Y al diseñar un sistema ISOS aparece una serie de obstáculos.

Ciertas características del fondo de recursos crean dificultades que el ISOS ha de abordar. Una es su heterogeneidad, la diversidad de tipos de procesadores y de sistemas operativos de los anfitriones. Las capacidades de memoria y de espacio en disco varían; hay una amplia gama de velocidades de conexión a Internet. Ciertos ordenadores están protegidos por cortafuegos u otras capas de programación similares que prohíben o dificultan las conexiones entrantes. Numerosos ordenadores son accesibles sólo de manera esporádica; los ordenadores personales fijos se apagan por la noche, y es frecuente que los portátiles y otros sistemas con módem estén desconectados. Unos ordenadores desaparecen de modo imprevisto —a veces definitivamente— mientras aparecen otros nuevos.

El ISOS debe, asimismo, cuidar de no enfrentarse a los dueños de los ordenadores anfitriones. Ha de ser mínima su repercusión en el uso que éstos hagan de ellos para fines ajenos al ISOS. Tienen que respetarse las limitaciones que impongan los propietarios, tales como la utilización exclusivamente nocturna o restringida a determinados tipos de aplicaciones. Aun así, el ISOS no puede confiar en que todo ordenador le agradezca su buen comportamiento cumpliendo las normas. Es posible que los propietarios inspeccionen y modifiquen las actividades de sus máquinas, que ciertos usuarios curiosos o maliciosos traten de perturbar o engañar al sistema, si no de aprovecharse del mismo. Todos estos problemas tienen gran influencia en el diseño de un sistema ISOS.

El beneficio de cada parte

Un sistema operativo que cubra el ámbito de Internet debe abordar dos aspectos fundamen-

tales: asignar recursos y compensar a los que los aporten. Ambas cuestiones pueden tratarse a la vez mediante un modelo basado en principios económicos; en él los suministradores alquilan recursos a los consumidores. En el decenio de 1980, el Centro de Investigación de Palo Alto de Xerox propuso y analizó métodos económicos para el reparto de los recursos informáticos. Hace menos, Mojo Nation ha desarrollado un sistema de ficheros compartidos en el que los usuarios cobran en una moneda virtual (el "mojo") a cambio de sus recursos, y a su vez pagan en "mojos" por utilizar el sistema. Modelos de este género animan a los propietarios a permitir que otras organizaciones utilicen sus recursos; la teoría indica que así se logra una asignación de los mismos óptima.

Aun con 150 millones de ordenadores a su disposición, los recursos del ISOS serán "escasos", pues algunas tareas necesitarán, y serán capaces de utilizar, medios prácticamente ilimitados. Como tiene que decidir sin cesar dónde se ejecutan los distintos procesamientos de datos y cómo se asigna espacio de almacenamiento, el ISOS ha de ver cómo realiza las tareas de la manera más económica. Debe actuar con equidad, sin permitir que la ejecución eficaz de una tarea vaya en detrimento de otra. Hay áreas activas de investigación dedicadas a formular con precisión estos criterios y a concebir algoritmos de planificación que los hagan realidad, siquiera sea aproximadamente.

El sistema económico aplicable a una red compartida debe definir las unidades básicas de un recurso, la utilización de un megabyte de espacio en disco por día, digamos, y asignar valores de acuerdo con propiedades como la velocidad de acceso al almacenamiento —el ancho de banda— y la frecuencia con que éste queda disponible para la red. Hay que definir, además, cómo se compran y se venden los recursos del sistema (por ejemplo, si debemos pagarlos por adelantado) y cómo se determinan los precios (en subasta o por un intermediario que establezca los precios).

Dentro de este contexto, el ISOS tiene que registrar con exactitud y seguridad la utilización de los recursos. Ha de incorporar en un banco interno unas cuentas de suministradores y consumidores, en las que anotará lo que debe cargar y abonar según el uso de los recursos. Los participantes podrán convertir esta moneda ficticia del ISOS en dinero real. El ISOS debe también garantizar que se satisfará lo prometido acerca de la disponibilidad de los recursos: Carmen no quiere que su película se corte a la mitad. El sistema económico deja a los suministradores controlar la utilización de sus recursos. Por ejemplo, la propietaria de un ordenador personal podría especificar que su procesador no se utilice entre las 9 y las 17 horas a menos que se pague un precio muy elevado.

El dinero, claro está, fomenta el fraude. Los participantes en el ISOS pueden intentar estafarse unos a otros de muchas maneras. Por ejemplo, los vendedores de recursos podrían modificar el programa agente del ISOS ejecutado en su ordenador, o engañarlo, de modo que entregue resultados ficticios sin haber realizado computación alguna. Se han investigado métodos estadísticos que descubran anfitriones deshonrados o con anomalías. Una idea reciente para impedir que se abone una computación que no se ha efectuado consiste en comprobar que cada unidad activa ofrece varios resultados intermedios, verificables con facilidad por el servidor, que sólo puedan haber obtenido si llevan a cabo la computación entera. Para evitar el fraude en el almacenamiento de datos y la prestación de servicios hay que buscar otros procedimientos.

Los recursos del ISOS suponen para los usuarios finales un coste que converge a una fracción del de adquisición del equipo. En el caso ideal, esta fracción sería lo bastante grande para que los propietarios se animasen a participar y lo bastante pequeña para que fuesen rentables muchas aplicaciones a escala de Internet. El dueño corriente de un PC puede considerar el sistema como una economía de trueque: disfruta de servicios gratuitos —la salvaguarda de ficheros, un anfitrión en la Telaraña Mundial— a cambio de que otros usen su procesador y espacio de disco, de otro modo desocupados.

Arquitectura básica

Nuestro diseño de un ISOS parte de dos principios fundamentales: que el sistema operativo sea

Números primos

Graham P. Collins

Nadie ha percibido (hasta ahora) señales de extraterrestres mediante un proyecto de computación distribuida, pero sí se han encontrado los números primos más descomunales conocidos, con gratificaciones abultadas y... complicaciones legales.

La Gran Búsqueda de Números Primos de Mersenne por Internet (GIMPS), que opera desde 1996, ha revelado hasta hoy cinco números primos extraordinariamente grandes. El último de ellos, el mayor, fue descubierto en noviembre de 2001 por Michael Cameron, joven de 20 años, en Owen Sound, Ontario. Los primos de Mersenne se indican mediante la expresión $2^P - 1$, donde P es, a su vez, un número primo. El hallado por Cameron es $2^{13.466.917} - 1$; harían falta cuatro millones de cifras para escribirlo. Su ordenador tardó 45 días en descubrir que ese número es primo; en conjunto, la red GIMPS invirtió 13.000 años de tiempo de ordenador en eliminar otros números que pudieran haber sido el trigésimo nono de Mersenne.

El 38.º número primo Mersenne, con sólo dos millones de cifras, le reportó a su descubridor (Nayan Hajratwala, de Plymouth, Michigan) un premio equivalente a 57.000 euros por ser el primer número primo de más de un millón de cifras. La obtención de un primo de diez millones de cifras se premiará con el doble.

QUE PODRIA HACER UN SISTEMA OPERATIVO A ESCALA DE INTERNET

Al contar con los ingentes recursos de computación desaprovechados de la red mundial, el ISOS abreviaría temibles tareas de procesamiento y almacenamiento de datos. Aquí sólo se ilustran algunas de las posibilidades:

Modelos financieros

Representación y animación tridimensionales

Salvaguarda y archivo de ficheros durante cientos de años

Red mundial de ordenadores

SETI: Análisis de señales de radio celestes

Comparación de secuencias de genes

Servicio de pago por ver películas (mientras se descargan)

mínimo y que ejerzan el control unos servidores centralizados. Un sistema operativo que sólo proporcione funciones esenciales se denomina micronúcleo. Las funciones superiores se construyen basándose en él en forma de programas de usuario; se puede así depurarlas y reemplazarlas con más facilidad. Este enfoque nació de investigaciones académicas e influyó en sistemas comerciales como el Windows NT. No son micronúcleos, sin embargo, la mayoría de los sistemas operativos más conocidos.

Las capacidades esenciales del ISOS comprenden la asignación de recursos (el reparto a largo plazo de la potencia de procesamiento y almacenamiento de los anfitriones), la planificación (la ordenación de los trabajos en colas, tanto en el sistema entero como en cada ordenador individual), el cómputo de la utilización de los recursos y los mecanismos básicos para distribuir y ejecutar programas de aplicación. El ISOS debe carecer de los elementos que ya residan en los sistemas operativos locales de los anfitriones.

La coordinación del sistema ha de encomendarse a servidores explotados por el proveedor del ISOS, sea una organización costeada por el Estado o un consorcio de empresas dedicadas a la compra y venta de recursos. (Cabe imaginar la competencia entre proveedores de ISOS, pero supondremos que sólo hay uno, para simplificar.) La centralización se opone al enfoque igualitario que adoptan ciertos sistemas "de igual a igual", pero se necesitan servidores centralizados para garantizar la privacidad de datos delicados, como los estados de las cuentas y otras informaciones sobre los ordenadores que prestan los recursos. Podría creerse que la centralización exigiría un sistema de control que se tornaría excesivamente grande e inmanejable cuando aumentase el número de ordenadores conectados al ISOS; parece, además, que cada vez que no estuviese disponible se formaría un cuello de botella que estrangularía el sistema. Tales temores carecen de fundamento, ya que un número razonable de servidores puede almacenar con facilidad información relativa a todos los ordenadores conectados a Internet y comunicarse regularmente con ellos. Napster, por ejemplo, atendió a casi sesenta millones de clientes mediante un solo servidor central. Es posible introducir redundancia en el complejo de servidores, de modo que la mayoría de los servicios ISOS en línea sigan funcionando, aun cuando los servidores no estén disponibles temporalmente.

El complejo de servidores del ISOS mantendría bases de datos con descripciones de los recursos, políticas de utilización y descripciones de tareas. La descripción del recurso comprendería, por ejemplo, el sistema operativo del ordenador, el tipo de procesador y su velocidad, el espacio total y el libre del disco, la capacidad de memoria, las estadísticas sobre el comportamiento de sus conexiones a la red y sobre los períodos en que está encendido y conectado a ésta. Las políticas de utilización detallarían las normas que impone el propietario relativas al uso de sus recursos. En las descripciones de tareas se señalarían los recursos asignados a un servicio en línea y los trabajos puestos en la cola para una tarea de procesamiento de datos.

A fin de poner sus ordenadores a disposición de la red, los vendedores de recursos se comunican con el complejo de servidores (mediante, digamos, un sitio de Internet) para descargar e instalar un programa agente del ISOS, vincu-

lar recursos a su cuenta en el ISOS, etcétera. El agente del ISOS gestiona la utilización de los recursos de los anfitriones y periódicamente obtiene del complejo de servidores una lista de las tareas a realizar.

Los compradores de recursos envían a los servidores peticiones de tareas y programas agentes de alguna aplicación (para que los ejecuten los anfitriones). Un proveedor de servicios en línea solicitaría al ISOS un conjunto de ordenadores que pueda utilizar, señalando los recursos que necesita (por ejemplo, un servicio de copias de seguridad distribuido podría utilizar anfitriones que estuviesen conectados esporádicamente —como el portátil de Carmen—; le costarían menos que los de conexión permanente). El ISOS suministra al servicio las direcciones y descripciones de los anfitriones que se le conceden, y ofrece al programa agente de la aplicación una comunicación directa entre los ordenadores que lo ejecutan. El servicio puede solicitar nuevos ordenadores cuando no se pueda disponer de algunos. El ISOS no impone cómo deben utilizar los clientes el servicio en línea, ni cómo el servicio ha de responder o cargar a sus clientes (a diferencia de los pagos controlados por el ISOS, que circulan de los usuarios de recursos a los propietarios de los anfitriones).

Equipo auxiliar de aplicaciones

En principio, las capacidades básicas del ISOS —asignación de recursos, planificación y comunicación— son suficientes para construir una gran variedad de aplicaciones. Sin embargo, la mayoría de ellas tienen subcomponentes importantes en común. Es, por tanto, útil contar con un juego de herramientas de software como ayuda adicional para los programadores que elaboran nuevas aplicaciones. El código de estas herramientas se incorporará en aplicaciones que se ejecutarán en los anfitriones. Cabe señalar los ejemplos siguientes:

Encaminamiento independiente de la posición. Las aplicaciones ejecutables en el ISOS podrán difundir copias de información y pasos de computación entre millones de ordenadores dotados de recursos. Han de poder acceder a unas y otros de nuevo. Para facilitarlo, las compañías denominan los objetos de su ámbito de competencia con "identificadores mundiales exclusivos" (*Globally Unique Identifiers*, GUID). Estos nombres permiten el "encaminamiento independiente de la posición", que es el medio de enviar peticiones a objetos sin saber dónde están situados. Un enfoque simplista del encaminamiento independiente de la posición consistiría en establecer una base de datos de GUID en una sola máquina, que sin duda no podría atender las peticiones de millones de ordenadores; por eso el equipo auxiliar ISOS distribuye la base de datos con los GUID entre los anfitriones. Hay varios proyectos en marcha que investigan la construcción de un sistema distribuido de este tipo, entre ellos el almacenamiento permanente de datos OceanStore, de la Universidad de California en Berkeley.

Almacenamiento permanente de datos. La información almacenada por el ISOS ha de ser capaz de sobrevivir a muy diversos infortunios. La herramienta para la permanencia de los datos contribuye a ese fin mediante mecanismos que codifican, reconstruyen y reparan los datos. Para conseguir una máxima supervivencia, los datos se cifran con un código "*m* entre *n*". El principio en que esto se basa recuerda a un holograma, donde una pequeña porción basta para reconstruir la imagen entera. La codificación reparte la información en *n* fragmentos (*n* anfitriones), siendo *m* cualesquiera de ellos suficientes para reconstruirla. Por ejemplo, podría codificarse un documento en 64 fragmentos de manera que para reconstruirlo bastasen 16 tomados al azar. También es importante que la reparación sea continua. En caso de fallo de los fragmentos, la herramienta de reparación los regeneraría. Una herramienta de permanencia de los datos bien construida conservará cientos de años la información.

Actualización segura. Surgen nuevos problemas cuando las aplicaciones necesitan actualizar la información almacenada. Por ejemplo, hay que poner al día todas las copias de la información, y los GUID de los objetos deben apuntar a la copia más reciente. Debe haber un mecanismo de control de acceso que impida actualizar la información a personas no autorizadas. La actualización segura se apoya en protocolos de conformidad alambicados, en los que un conjunto de anfitriones llega a una decisión correcta aunque la tercera parte de ellos intenten llevar a mal fin el proceso.

Otras herramientas. El juego de herramientas también presta asistencia con algunos componentes adicionales, como la conversión de formatos (exigida por la heterogénea naturaleza de los anfitriones) y las bibliotecas de sincronización (que ayudan a la cooperación entre anfitriones).

Un sistema ISOS ha de padecer el acostumbrado círculo vicioso que frena la adopción de nuevas técnicas: mientras no exista un amplio número de usuarios sólo habrá un conjunto limitado de aplicaciones viables en ISOS; a la inversa, mientras no abunden las aplicaciones el número de usuarios se mantendrá reducido. Pero el sistema crecerá con rapidez si se logra un volumen crítico tras convencer de la utilidad intrínseca de un ISOS a un número suficiente de diseñadores y usuarios.

Internet sigue siendo un recurso inmenso sin explotar. El revolucionario ascenso de la popularidad de la Malla Máxima Mundial no ha modificado esta situación; sólo ha agrandado en la misma medida el fondo de máquinas disponibles. Un sistema operativo a escala de Internet dejaría a los programadores en libertad para crear aplicaciones ejecutables en este Ordenador Máximo Mundial sin que tuviesen que preocuparse por el equipo físico.

Bibliografía complementaria

THE GRID: BLUEPRINT FOR A NEW COMPUTING INFRASTRUCTURE. Dirigido por I. Foster y C. Kesselman, Morgan Kaufmann Publishers, 1988.

PEER-TO-PEER: HARNESSING THE POWER OF DISRUPTIVE TECHNOLOGIES. Dirigido por Andy Oram. O'Reilly & Asociates, 2001.

Satélites, clima y glaciares

Los satélites de observación de la Tierra constituyen una valiosa herramienta para el conocimiento de los fenómenos dinámicos que gobiernan el ambiente

Carmelo Alonso Jiménez y Victoriano Moreno Burgos

El 4 de octubre de 1957 se puso en órbita el *Sputnik 1*. Desde entonces, los satélites han cambiado nuestra concepción del mundo. Existe hoy una extensa cohorte de ellos en órbita alrededor de nuestro planeta, destinados a usos civiles y militares. Entre los usos civiles destacan las telecomunicaciones, la localización de un objetivo y la observación de la Tierra.

El lanzamiento del primer ERTS (siglas de la expresión inglesa para designar al satélite centrado en los recursos naturales y técnicas asociadas) inaugura, en 1972, la teledetección espacial. Estos satélites de observación van equipados con instrumentos aptos para registrar el relieve terrestre, los océanos y la atmósfera. La información aportada por tales sensores reviste sumo interés para la investigación básica y aplicada.

Con su seguimiento permanente y sistemático de los fenómenos atmosféricos, los satélites meteorológicos aportan los datos que, combinados con los obtenidos por estaciones terrestres, permiten elaborar pronósticos en tiempo real y alimentar a los modelos numéricos de predicción climática. La identificación y la cartografía de las áreas con alto riesgo de inundaciones, por ejemplo, constituye un requisito obligado para cualquier estudio de planificación territorial. Mediante la teledetección podemos delimitar el área afectada por una avenida y observar los efectos de la misma en las zonas circundantes, tales como la erosión del suelo o la acumulación de materiales.

De las imágenes de satélite se puede extraer información sobre la extensión y localización de los recursos forestales, además de los cambios operados por tala, ramoneo o incendios. Nos ayudan también a conocer el impacto ambiental causado por vertidos y otras agresiones al medio. O a descubrir los efectos de la escasez de agua por sobreexplotación de los depósitos y cambios en el régimen de lluvias.

De las emisiones de dióxido de carbono a la deforestación o la desertización, son muchos los factores que afectan al clima. Analizando las imágenes de satélite, correspondientes a diferentes fechas, podemos estudiar, por ejemplo, los avances y retrocesos que experimentan los glaciares de montaña, sistemas dinámicos especialmente sensibles a las condiciones del entorno. Podríamos incluso decir que son una suerte de "barómetro" climático local.

¿De qué hablamos?

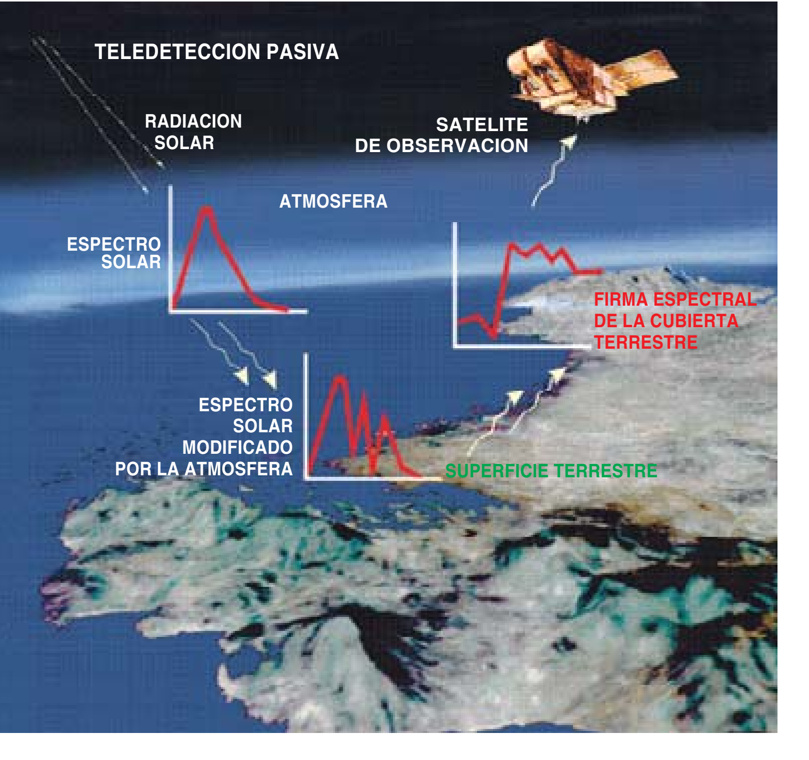
Los datos recabados por los sensores instalados a bordo de los satélites se analizan luego mediante técnicas de procesado digital e interpretación de imágenes. El intercambio de información entre el sistema dinámico terrestre sometido a observación y el sensor se realiza a través de un flujo de energía electromagnética, que tiene un carácter unidireccional en la teledetección pasiva y, bidireccional, en la activa.

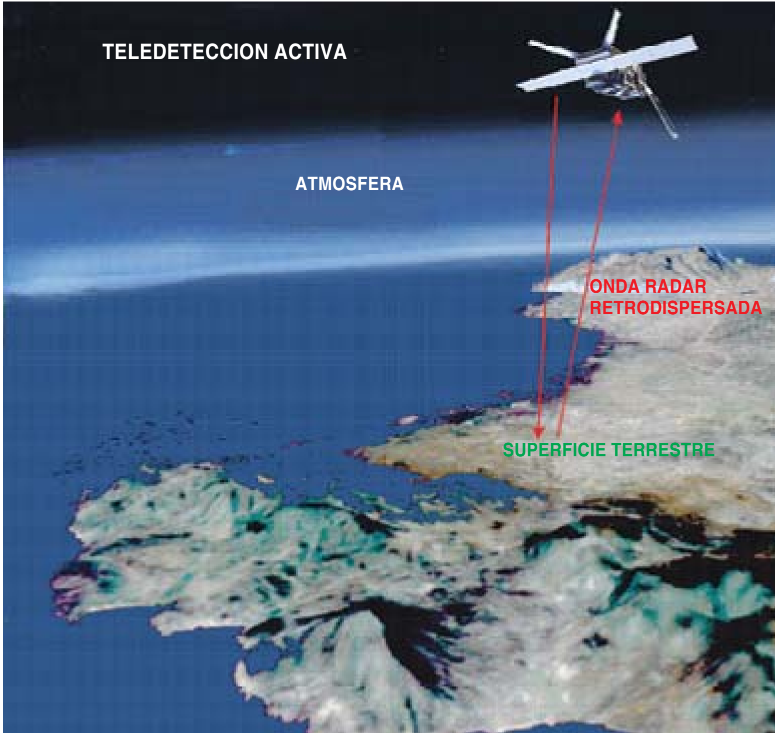
En la teledetección pasiva la fuente primaria de radiación es el Sol. Aunque la radiación solar cubre el espectro electromagnético, los sensores trabajan en la región del visible y diversas partes del infrarrojo, incluido el térmico, con longitudes de onda del orden de micrometros. Al atravesar la atmósfera, esta energía se ve sometida a modificaciones de intensidad y de distribución espectral. Tras la interacción con la superficie terrestre, la energía reflejada re-

1. OBSERVACION DE NUESTRO PLANETA desde el espacio. Se emplean dos técnicas. En la teledetección pasiva se recoge la radiación solar reflejada por la superficie terrestre y la radiación térmica emitida por la propia Tierra. La ventaja que supone utilizar esta radiación se ve contrarrestada por las modificaciones que produce la atmósfera. En la teledetección activa, el propio satélite es la fuente de radiación con la que ilumina la superficie de la Tierra sin verse afectada por la atmósfera.

Los autores

CARMELO ALONSO JIMENEZ y VICTORIANO MORENO BURGOS desarrollan su actividad profesional en el departamento de teledetección de INDRA ESPACIO. Ambos se formaron en la Universidad Complutense de Madrid.





torna a la atmósfera, donde sufre nuevas modificaciones antes de alcanzar el sensor, quien remite los resultados de sus mediciones a las estaciones receptoras en Tierra.

En la teledetección activa, el sistema terrestre que se pretende observar se irradia con una fuente artificial instalada en el propio satélite. Podemos, pues, controlar la potencia, longitud de onda, polarización y ángulo de iluminación de la radiación electromagnética emitida; el sensor registra la radiación retrodispersada por la superficie.

El flujo de radiación incidente sobre una zona de la superficie terrestre se denomina irradiancia. En parte se refleja (constituyendo el albedo de la superficie), en parte se absorbe y en parte se transmite por la zona en cuestión. En teledetección pasiva, la superficie terrestre se considera opaca, de nula transmisividad; en ella, pues, las fracciones reflejada y absorbida son complementarias.

Con el tiempo, la energía absorbida por la superficie se libera. Es lo que se llama su emisividad. Mientras que la reflexión se centra en la banda del espectro con longitudes de onda comprendidas entre 0,3 y 3 µm, la emisión lo hace en la banda del infrarrojo térmico, entre 7 y 18 µm. Los sensores pasivos utilizan esta segunda banda para determinar la temperatura de la superficie terrestre a partir de su relación con la cuarta potencia de la temperatura (ley de Stefan-Boltzmann). En la reflexión y la emisión de energía se fundamentan las mediciones de teledetección pasiva.

Los tipos de cobertura superficial (bosques, campos de cultivo, espejos de agua, suelos con escasa vegetación, nieve o hielo) se distinguen por la energía que reflejan y emiten. Tal peculiaridad diferenciadora constituye su firma espectral. En la banda del espectro correspondiente al visible-infrarrojo cercano, la radiación reflejada por los vegetales presenta un máximo relativo de alrededor de 0,65 µm y un aumento brusco hacia los 0,75 µm, que se mantiene constante hasta los 1,3 µm; se presenta otro máximo hacia los 1,6 µm.

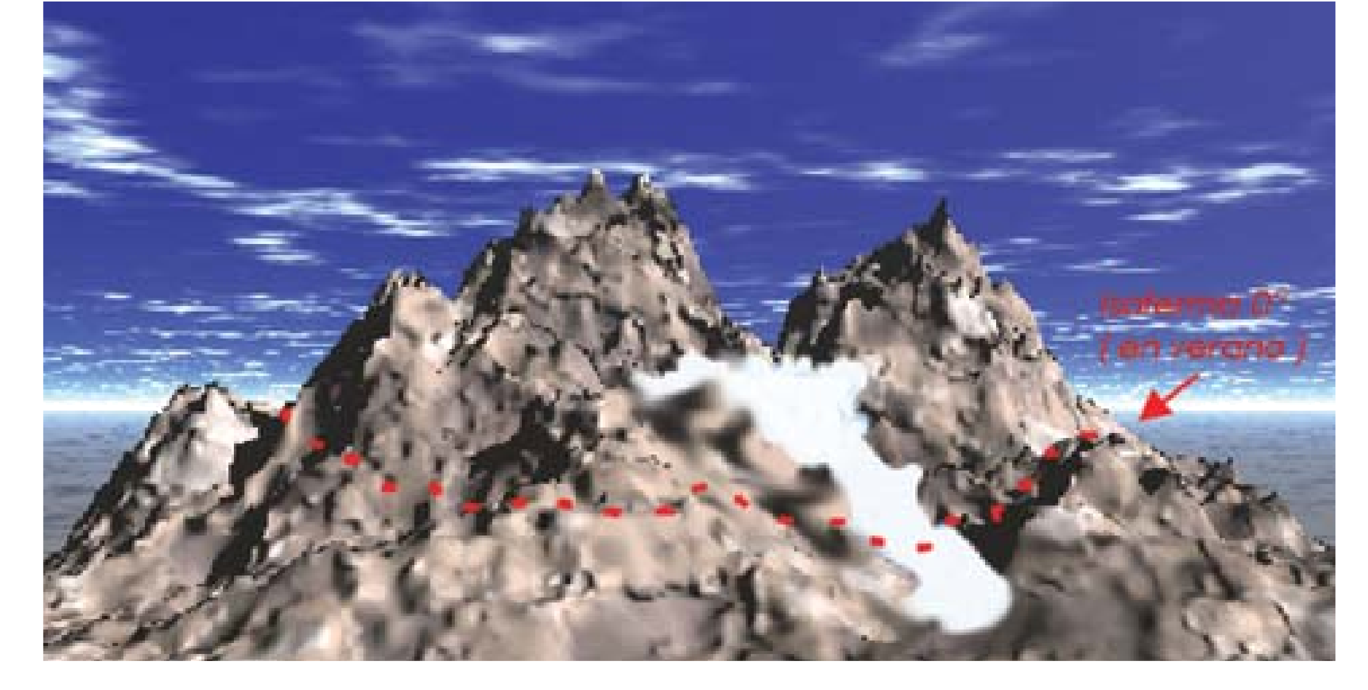
La absorción de la radiación incidente producida por la clorofila es la responsable de la baja reflectividad en la región visible y del pico en 0,65 µm, mientras que la estructura interna de las hojas es la responsable de la intensa reflectividad por encima de los 0,75 µm. Dicha estructura y, por tanto, la reflectividad en esta banda difiere de una familia vegetal a otra, variando también con el tiempo y con la presencia de enfermedades.

En el infrarrojo térmico, el espectro de emisión de la cubierta vegetal depende de la transpiración. Durante el día las hojas a plena luz cierran sus estomas para evitar la desecación. Durante la noche se abren y la temperatura de las hojas se hace un poco superior a la del ambiente. El análisis del comportamiento de los vegetales en el infrarrojo térmico nos permite distinguir entre diferentes familias e incluso entre árboles sanos y enfermos.

La atmósfera distorsiona estos espectros de radiación reflejada y emitida: absorbe energía en unas bandas, dispersa la radiación en otras y, como todo cuerpo "caliente", emite en el infrarrojo térmico. Todo ello convierte a la atmósfera en un filtro selectivo, de suerte que, en algunas regiones del espectro, se hace prácticamente imposible la observación. Las principales ventanas atmosféricas son, en el visible e infrarrojo cercano, entre 0,3 y 1,35 µm; en el infrarrojo medio, entre 1,5 y 1,8 µm, entre 2 y 2,4 µm, entre 2,9 y 4,2 µm y entre 4,5 y 5,5 µm; en el infrarrojo térmico, entre 8 y 14 µm; y las microondas por encima de 2 cm.

Satélites de observación

Los satélites meteorológicos son geosíncronos, es decir, su período orbital coincide con el de rotación de la Tierra. Para ello se mantienen en órbitas sobre el ecuador a una altura de unos 36.000 km,



siempre sobre el mismo punto de la superficie terrestre. Proporcionan una visión instantánea global cada 30 minutos. Un satélite de este tipo es el METEOSAT.

Los satélites de recursos naturales son heliosíncronos. El paso de la sonda sobre un punto de la superficie terrestre ocurre siempre a la misma hora; la relación angular entre éste y el plano orbital del satélite se mantiene constante. Con un período de revolución inferior a dos horas, los satélites de esta clase están situados entre 500 y 1500 km de altura. A unos 832 km se halla el IRS-1C, a 830 el SPOT, a unos 785 km ERS-1 y ERS-2, y a 705 el LANDSAT-5, por citar algunos.

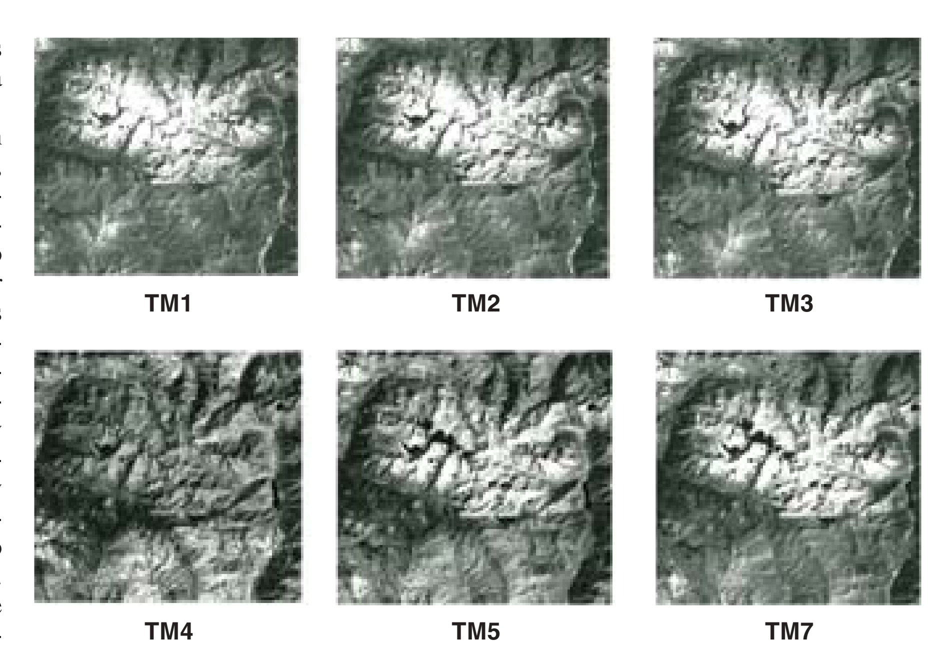
El proceso de adquisición de datos se realiza a través de sensores óptico-electrónicos, que recogen la energía reflejada o emitida por la superficie terrestre. Convenientemente codificada en lo que se llama valor digital, la información se archiva en ordenadores para su manipulación ulterior. En el sensor pasivo de alta resolución en el visible, a bordo del satélite SPOT se disponen en línea una serie de detectores de acoplamiento de carga que abarcan todo el campo de visión, fragmentando la imagen en celdas o píxeles. En los sensores de barrido multiespectral y cartográfico, asimismo pasivos, del LANDSAT-5, se barre la escena con un espejo basculante cuyo eje de oscilación es paralelo a la trayectoria del satélite portador.

Dentro de los sensores activos de los satélites ERS-1 y 2 destaca el radar de apertura sintética, que opera en el intervalo de longitudes de onda entre 5,2 y 7,1 cm, correspondiente a la región de las microondas. La antena emite pulsos en la dirección perpendicular a la trayectoria del satélite. Estos pulsos de microondas se dispersan al interaccionar con la superficie terrestre; los pulsos retrodispersados hacia la antena son recogidos para su ulterior procesamiento, que dará por resultado la formación de una imagen. En resumen, la imagen creada contiene información sobre el coeficiente de

2. EL BALANCE DE MASA DE UN GLACIAR viene regulado por la isoterma de cero grados. Por encima de esta línea imaginaria de equilibrio predomina la acumulación de hielo; por debajo, su fusión. Las alteraciones que sufre el clima de la Tierra se reflejan en la cota a la que se sitúa dicha línea.



3. EN ESPAÑA las masas glaciares se encuentran distribuidas a lo largo del Pirineo aragonés. De ellas, el glaciar del Aneto es el de mayor extensión, seguido por el de la Maladeta.



4. LOS SENSORES PASIVOS detectan la radiación electromagnética que les llega del suelo en diferentes intervalos de longitudes de onda, o bandas. El sensor cartográfico del satélite LANDSAT registra la información contenida en siete bandas: tres dentro de la región visible del espectro (TM1, TM2 y TM3) y el resto en la región infrarroja (TM4, TM5 y TM7) y el infrarrojo térmico (TM6).

retrodispersión de microondas correspondiente a la cobertura observada sobre la Tierra.

En estos procesos importa un parámetro sobre todo, a saber, el poder de resolución, la capacidad para distinguir entre señales próximas en el espacio o de espectro similar. Para medir variables biofísicas y climáticas los sensores aplicados a la teledetección deben atender a cuatro tipos de resolución: espectral, espacial, temporal y radiométrica. La resolución espectral concierne al número y anchura de los intervalos de longitud de onda en el espectro electromagnético, a las bandas. Los sensores activos son los que poseen menor resolución espectral ya que suelen trabajar en un solo canal, en tanto que los pasivos presentan resoluciones espectrales en varias bandas.

La resolución espacial es un índice de la menor separación angular o lineal entre dos objetos que puede detectar el sensor. Esta distancia, que corresponde al tamaño del píxel, depende de la altura a la que se encuentra el satélite, su velocidad y el número de detectores de que consta el sensor. En algunos de los sensores pasivos en explotación varía desde los cerca de 6 m hasta los 120 m. La resolución temporal, relativa a la periodicidad orbital del satélite, define el número de días u horas que transcurren entre dos observaciones consecutivas de la misma porción de la superficie terrestre. Por último, la resolución radiométrica es la capacidad del sensor para detectar variaciones en el flujo de radiación (8 bits para la mayoría de los sensores actuales).

La imagen digital constituida como resultado final representa, mediante una matriz numérica, la superficie acotada. Cada componente de la matriz es un punto imagen o píxel y su valor numérico indica la intensidad de radiación recibida por el sensor. Esta representación posibilita que las imágenes se sometan a diferentes algoritmos matemáticos, que generarán nuevas imágenes, donde aparezcan las características buscadas de la porción de superficie de la Tierra observada.

Métodos matemáticos

Entre los tratamientos matemáticos empleados merecen citarse los procesos de georreferenciación y de corrección atmosférica. El primero, imprescindible para poder superponer a la imagen cualquier información cartográfica auxiliar o para acometer un estudio multitemporal entre dos o más imágenes, consiste en dotar a la imagen de planimetría. Para ello se establece una transformación matemática entre las coordenadas de un punto localizado en la imagen, un cruce de carreteras o de ferrocarril por ejemplo, y el mismo punto localizado sobre un mapa.

La corrección atmosférica se hace obligada, dada la presencia de aerosoles, partículas en suspensión y vapor de agua que dispersan la radiación transmitida entre la superficie y el sensor. A ese fenómeno de dispersión Rayleigh-Mie se debe el color azul del cielo durante el día y de sus tonos anaranjados durante el atardecer. Las correcciones atmosféricas, que requieren modelos matemáticos muy refinados, tienden a eliminar en lo posible las alteraciones en el registro de la imagen como consecuencia de dicha dispersión.

Una vez georreferenciada la imagen y corregidos los efectos atmosféricos, los técnicos disponen de distintos métodos para extraer de ella la información necesaria. Los métodos más simples combinan los datos adquiridos en diferentes bandas espectrales para obtener imágenes coloreadas, como es el caso del falso color. Para clasificar por temas los valores digitales de los píxeles que componen la imagen se ha de recurrir a métodos más complejos, entre ellos los basados en índices espectrales, como el índice de vegetación.

Dinámica glacial y variabilidad climática

Con las técnicas de teledetección espacial podemos avanzar la influencia del cambio climático en nuestro entorno. En particular, la fracción reflejada de la radiación de onda corta incidente reviste

Banda 5

ROJO

Banda 5

VERDE

Banda 2

AZUL

5. LAS IMAGENES OBTENIDAS EN CADA BANDA, representadas en blanco y negro, pueden asociarse con los tres colores elementales: rojo, verde y azul. Se obtienen así imágenes coloreadas que pueden ser de color real o falso color. Estas composiciones permiten una mejor discriminación de las cubiertas terrestres que las bandas originales.

interés en los estudios de la cobertura de nieve. Los glaciares cubren alrededor del 10 % de la superficie sólida de la Tierra. De ellos, sólo el 1 % está ocupado por los glaciares de montaña, mientras que antaño llegaron a cubrir más del 30 % de las tierras emergidas del hemisferio norte.

Los cambios en la extensión de los glaciares de montaña en el pasado y en el presente ponen de manifiesto la variabilidad del clima terrestre en los últimos 100.000 años. Si la geomorfología nos ayuda a conocer la dinámica de los glaciares durante el Pleistoceno y el Holoceno, las crónicas históricas nos relatan su evolución a lo largo del último milenio; las imágenes de satélite nos ofrecen sus últimos 25 años. Pero, ¿qué relación existe entre cambios climáticos y variación de los glaciares?

Los glaciares de montaña son masas móviles de hielo y nieve granulada. Se originan por metamorfosis a partir de la acumulación y compactación de nieve en la cabecera, o circo glaciar. La nieve depositada en esas zonas de escasa pendiente termina por adquirir un espesor enorme. En virtud de la presión que ejercen las capas superiores, las inferiores pierden parte del aire que tenían encerrado entre sus cristales y se trasforman en neviza, de mayor consistencia que la nieve. La densidad media de la nieve, del orden de 0,35 g/cm^3, aumenta hasta el valor correspondiente a la neviza, 0,55 g/cm^3.

A medida que la neviza pierde aire con la profundidad, adquiere mayor transparencia, compacidad y dureza, hasta convertirse en el hielo esponjoso que da origen, por recristalizaciones, a una masa cristalina y azulada. Este hielo de glaciar presenta una densidad media entre 0,80 y 0,90 g/cm^3; se comporta como un material plástico y moldeable que permite el lento desplazamiento de la estructura entera, pendiente abajo, por efecto de la gravedad.

En su continuo descenso, la lengua glaciar baja hasta una altitud en que la temperatura ambiente, superior a 0 ºC, favorece la ablación de la masa helada. La línea que une los puntos con esta temperatura determina la isoterma de cero grados; la isoterma constituye una línea imaginaria de equilibrio que separa la zona alta, donde predomina la acumulación, de la zona inferior, donde la ablación es más fuerte. La cota media a la que se sitúa, H^o, fluctúa estacionalmente desde un valor mínimo (cota más baja alcanzable en la estación fría, $H^o_{mín}$) hasta un valor máximo (cota más alta que puede alcanzarse en época estival, $H^o_{máx}$). Cualquier relación causal entre el cambio climático global y los glaciares debe también explicar la pauta de variación temporal interestacional de estas cotas.

Un calentamiento generalizado de la atmósfera se traducirá en un aumento de la altitud de la línea de equilibrio, $H^o_{máx}$, con el tiempo. El equilibrio de masa del glaciar quedará entonces descompensado, pues se estrechará la zona de deposición de la nieve, mientras que aumentará la parte sometida a fusión. El resultado neto será una disminución del volumen del glaciar y, por tanto, un retroceso de su frente hacia un nivel más alto en el valle.

El balance de masa del glaciar es el parámetro determinante de los cambios de su tamaño, que se manifiestan en cambios del área del mismo. El tiempo de retraso depende de la respuesta dinámica, que varía de un glaciar a otro en función de su tamaño, la superficie y los regímenes térmicos e hidráulicos. El balance neto en cualquier punto del glaciar durante determinado período de tiempo viene dado por la diferencia entre la masa acumulada y la ablación en dicho intervalo.

El principal elemento regulador del clima terrestre y, por tanto, de la dinámica de los glaciares es el balance entre la energía solar incidente, la fracción reflejada de la misma y la energía infrarroja emitida en forma de radiación térmica por la superficie.

La cantidad de energía solar que incide, por unidad de tiempo, sobre una superficie unitaria per-

pendicular a la dirección de irradiación se denomina constante solar; tiene un valor medio de 1370 Wm^{-2}. En 1924, Milutin Milankovich, de la Universidad de Belgrado, demostró que la constante solar no era tal, sino que su valor variaba con el tiempo de forma periódica, debido a tres factores astronómicos. En primer lugar, la figura elipsoidal de la Tierra; en razón de ello, su eje de rotación experimenta una precesión. En segundo lugar, el ángulo entre el eje de rotación de la Tierra y el plano perpendicular a la eclíptica, cifrado en 23º 27’, sufre fluctuaciones a lo largo del tiempo debido a la influencia gravitatoria de los demás planetas. Por último, la excentricidad de la órbita terrestre también experimenta variaciones periódicas, con la variación consiguiente de la distancia media entre la Tierra y el Sol. Para un valor de la excentricidad mayor disminuye el flujo anual de energía solar incidente.

Los períodos característicos de los efectos producidos por cada uno de los tres factores son de 22.000, 41.000 y 100.000 años, respectivamente. Estos ciclos se han observado a partir de las variaciones de la composición isotópica del oxígeno de los foraminíferos bentónicos en los sedimentos marinos.

Por otro lado, el albedo depende, entre otras cosas, de la distribución del hielo y la nieve sobre la superficie. Si las zonas cubiertas por hielo y nieve se reducen, disminuirá. Entonces, la superficie terrestre absorberá más energía y el sistema se calentará aún más, provocando a su vez la reducción de la capa de hielo.

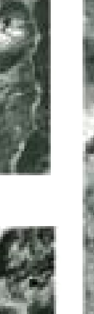
Pero eso no es todo. Del aumento de la concentración de dióxido de carbono y otros gases de invernadero en la atmósfera se sigue un aumento generalizado de la temperatura terrestre. Estos gases actúan como pantalla en un solo sentido: dejan que la energía solar caliente la superficie e impiden que la energía térmica reemitida se pierda en el espacio. Por tanto, la disminución del albedo global de la Tierra y el aumento de la concentración de los gases invernadero se acoplan intensificando el efecto de calentamiento global y provocando una aceleración en el retroceso experimentado por la cubierta de hielo.

Dinámica glaciar en el Pirineo

En el Pirineo español las masas glaciares se distribuyen desde el macizo de Balaitous, en la cuenca del río Gállego, hasta el Aneto-Maladeta, en las cuencas de los ríos Esera y Noguera-Ribagorzana. Son los únicos representantes de las masas móviles de hielo en la península y los más meridionales de



TM3



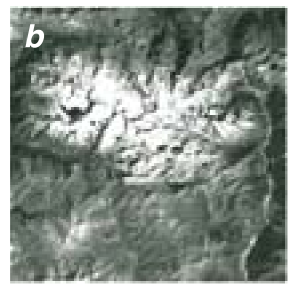




NDVI

TM4





TM2

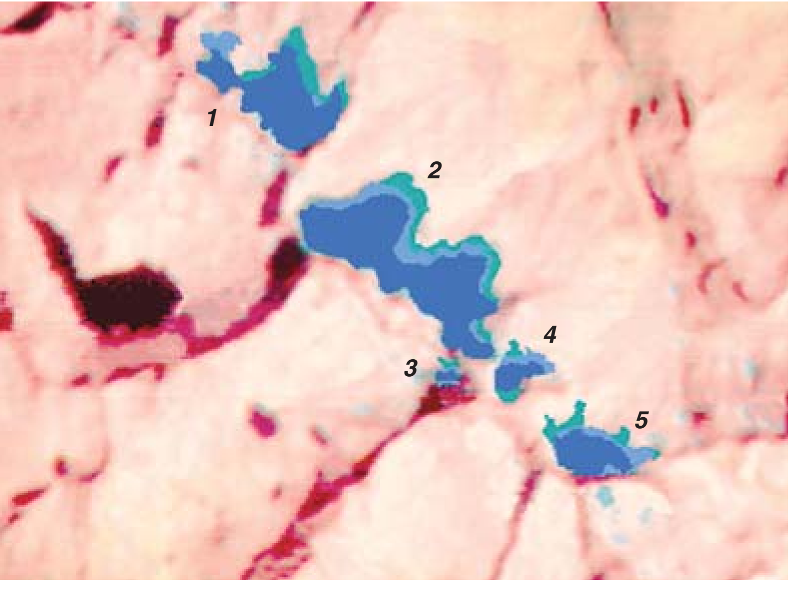


TM5



NDSI

6. PUESTO QUE LAS IMAGENES de la Tierra que adquieren los satélites son matrices de números, podemos realizar con ellas operaciones algebraicas que ayuden a mejorar la discriminación entre las coberturas terrestres. Entre estas operaciones se encuentran el índice de vegetación (*a*) y el índice de nieve (*b*).



7. UTILIZANDO LAS TECNICAS DE TELEDETECCION espacial pueden observarse las variaciones experimentadas por la superficie de los glaciares en diferentes períodos de tiempo. (1) Glaciar de la Maladeta, (2) glaciar del Aneto, (3) glaciar de Coronas, (4) glaciar de Barrancs, (5) glaciar de Tempestades.

Europa. Según un inventario oficial realizado en la segunda mitad de los años ochenta del siglo XX, había 26 glaciares y 3 heleros, ocupando los primeros una extensión total de 509 hectáreas. Otro inventario más reciente, realizado a principios de los años noventa por J. Chueca y F. Lampre, rebajó el número de glaciares a 16 y una extensión total aproximada de 387,5 hectáreas.

F. Schrader, que acometió a finales del siglo XIX el estudio sistemático de los glaciares pirenaicos, identificó en el macizo del Aneto 11 glaciares con una extensión total de 692 hectáreas; la mayor superficie correspondía al del Aneto, con 228 hectáreas, 116 hectáreas abarcaba el de Maladeta y el más pequeño era el de Alba, con 12 hectáreas. En la cartografía inicial de casi una centuria después, se determinó la extensión de estos mismos glaciares en 136 hectáreas para el del Aneto, 75 hectáreas para el de Maladeta y 1,5 para el de Alba.

A lo largo del siglo XX, el glaciar del Aneto había sufrido, pues, una pérdida de masa con una tasa media de 1 hectárea por año. En la actualidad algunos de ellos han quedado reducidos a pequeños heleros condenados a desaparecer. De otros sólo queda el rastro geomorfológico de su presencia esculpido en la roca.

En 1995 y 1996 desarrollamos en el departamento de teledetección de Indra Espacio una investigación sobre los efectos que la variabilidad climática ejerce sobre la dinámica de los ecosistemas terrestres. Trabajamos sobre imágenes adquiridas por el sensor cartográfico del LANDSAT-5. Emprendimos un análisis multitemporal para determinar el retroceso de los glaciares. En teledetección, un análisis multitemporal implica la manipulación de imágenes de la misma zona adquiridas en diferentes fechas.

Nuestro trabajo se centró en el macizo del Aneto. Coronado por el pico del mismo nombre a 3404 metros de altura, cuenta con el mayor aparato glaciar en extensión y volumen de toda la cordillera. Este macizo es la terminación occidental de un extenso batolito granodiorítico que se extiende desde el valle del río Noguera Pallaresa hasta el Esera.

Dado que queríamos observar los glaciares y que éstos se encuentran en zonas de notable acumulación invernal de nieve, seleccionamos las fechas de adquisición de las imágenes en función de la fusión de la nieve depositada y de la ausencia de nubes que ocultasen los glaciares. Utilizamos imágenes de verano tomadas entre 1985 y 1991.

La firma espectral de la superficie cubierta de hielo o nieve se caracteriza por presentar una reducción general de la reflectancia con el incremento de la longitud de onda; es máxima en las bandas correspondientes al visible y mínima en el infrarrojo medio. Además, este comportamiento depende de la presencia y concentración de sustancias contaminantes en la nieve, del ángulo de observación y de la rugosidad de la superficie.

En el proceso de elaboración de mapas de distribución de los glaciares y en la estimación de las características de los mismos, importa no confundir tales estructuras con otras cubiertas de la superficie ni, sobre todo, con las nubes. Jeff Dozier, de la Universidad de California en Santa Bárbara, mostró en 1988 que la principal propiedad óptica del hielo y del agua residía en la relación entre el flujo de energía incidente y el absorbido. En la banda 2 del Landsat-TM la nieve brilla más que cualquier otra superficie natural, mientras que en la banda 5 del mismo sensor la reflectancia de las nubes sigue siendo muy alta, cayendo a valores próximos a cero para el hielo. Este hecho permite una buena discriminación entre glaciares y nubes mediante el sensor cartográfico del LANDSAT.

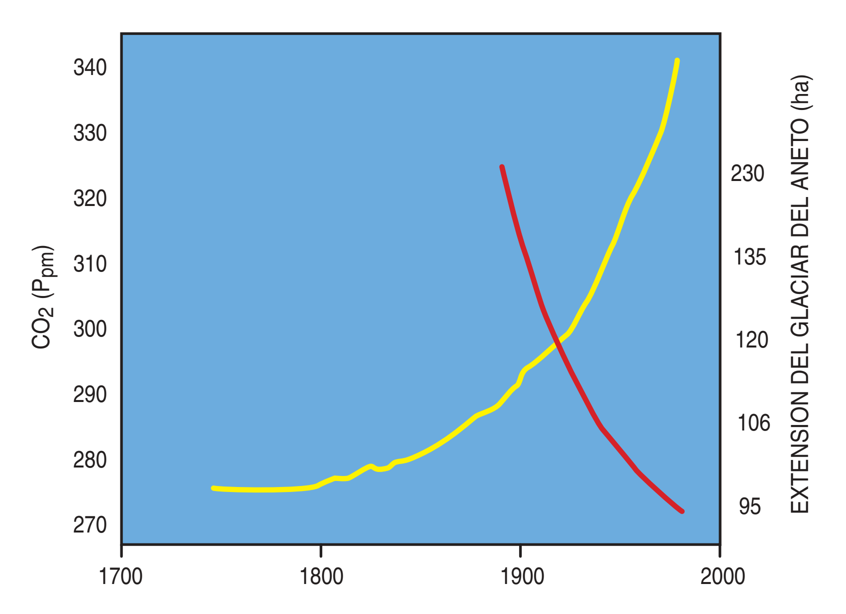
Estas bandas se toman como base para realizar una operación algebraica, que nos dará una nueva imagen. La operación consiste en tomar la matriz de los valores digitales registrados por el sensor en la banda 2 del espectro electromagnético, esto es, la imagen en dicha banda, y restarle la matriz de los valores digitales registrados en la banda 5. El resultado es otra imagen que sólo contiene información sobre las masas glaciares. A la nueva imagen se la denomina índice de nieve.

A partir de estas imágenes, digitalizamos los contornos de los glaciares, para conocer las diferencias en su evolución temporal. El glaciar del Aneto, que contaba con 118 hectáreas en 1985, abarcaba, en 1991, 95,3 hectáreas: había disminuido a una tasa media anual de 3,8 hectáreas, casi cuatro veces superior a la tasa de retroceso correspondiente a la primera mitad del siglo.

Podemos comparar los datos del retroceso experimentado por los actuales glaciares con la disminución de extensión de los paleoglaciares en el pasado. Combinando el trabajo de campo con imágenes obtenidas por sensores de alta resolución espacial, como los de los satélites SPOT o IRS-1C, podemos establecer la secuencia de esa retracción, que no es

otra que la respuesta de estos sistemas a la variabilidad natural del clima. Esta comparación nos permitirá calibrar la magnitud del efecto antrópico sobre el clima.

En el macizo del Aneto, la temperatura muestra un descenso con la altitud con un gradiente de 0,5 a 0,6 ºC por cada 100 metros. Con ello, la isoterma de cero grados en la época estival ($H^{o}_{máx}$) se sitúa entorno a los 3000 metros, y en el período que va de diciembre a marzo dicha isoterma llega a descender hasta los 1600 metros ($H^{o}_{mín}$). El aumento generalizado de temperatura de la atmósfera afecta también a la dinámica de esta última cota. Esto se traduce en variaciones estacionales de la cubierta de nieve. La medida de su extensión y el equivalente en agua constituye otra de las aplicaciones interesantes de la teledetección espacial.



8. EVOLUCION de la concentración atmosférica de CO_2 (*amarillo*), según el análisis químico de las burbujas de aire encerradas en el hielo antártico, y mediciones directas en los últimos 30 años. En rojo se representa la evolución del mayor de los glaciares pirenaicos en los últimos 100 años. En tamaño comportamiento se basan quienes pronostican un calentamiento de la atmósfera.

Para la estimación de las condiciones de fusión y el equivalente en agua de la nieve es necesario recurrir a la región de las microondas, a través de los sensores activos. En ellos, la longitud de onda de las microondas desempeña un papel importante en la interacción entre el pulso incidente y la superficie de la nieve. La profundidad de penetración del pulso en la nieve depende de la longitud de onda; a medida que aumenta ésta, lo hace también la profundidad de penetración. Para una longitud de onda de 3 cm, el pulso penetra en la nieve seca hasta una profundidad de 10 m. Un pulso de una longitud de onda de 5 cm, que es la que corresponde a la banda C del sensor del ERS-1, la profundidad de penetración llega hasta 18 metros.

En los sensores activos conviene tener en cuenta que el coeficiente de dispersión de microondas depende directamente de la constante dieléctrica de la superficie. Las características de la propagación de una onda electromagnética en un medio, pensemos en su velocidad de propagación, dependen de dicha constante dieléctrica. Con mayor propiedad, el cociente de las constantes dieléctricas en dos medios distintos (en este caso el aire y la nieve) determina los coeficientes de transmisión y de reflexión de la radiación electromagnética en la interfase que separa dichos medios.

En la nieve, el valor de la constante dieléctrica, y por tanto el coeficiente de dispersión, varía en función de su contenido en agua líquida. Cuanto mayor es el contenido de humedad de la nieve, mayor es su coeficiente de dispersión. En este comportamiento nos basamos para separar la nieve seca, cuyo coeficiente es similar al de las superficies libres de nieve, de la nieve húmeda. Podemos así precisar el comienzo de la fase de fusión nival y, mediante un seguimiento multitemporal, evaluar la cantidad de agua disponible en los ríos en diferentes períodos de tiempo.

La observación de los glaciares de montaña y de la cubierta de nieve desde el espacio ha de hacer frente a un problema singular: coinciden con regiones con una cobertura nubosa persistente, lo que dificulta la toma de datos, en especial por los sensores ópticos pasivos. Por eso, los sensores activos resultan imprescindibles en este tipo de observaciones.

Parece estar cada día más clara la influencia que las actividades humanas tienen sobre el clima. Con el fin de poder emprender medidas correctoras, es necesario conocer el alcance de dicha influencia. En ese camino, la observación de la Tierra desde el espacio desempeña un importante papel. La toma continua de datos por parte de los satélites permite un seguimiento permanente de la evolución de aquellos procesos cuya dinámica está ligada al clima. Tal es el caso de las cubiertas de hielo y nieve sobre el planeta.

Bibliografía complementaria

THEORY AND APPLICATIONS OF OPTICAL REMOTE SENSING. G. Asrar Ed. John Wiley; 1989.

ELEMENTOS DE TELEDETECCIÓN. C. Pinilla. RA-MA; 1995.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES LANDSAT-TM EN LA CARTOGRAFÍA DE LAS MASAS DE HIELO Y NIEVE APLICADA A LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA. C. Alonso y V. Moreno en *Revista de Teledetección*, vol. 7 páginas 35-47; diciembre 1996.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Wolfgang Bürger

Juegos con tiovivos

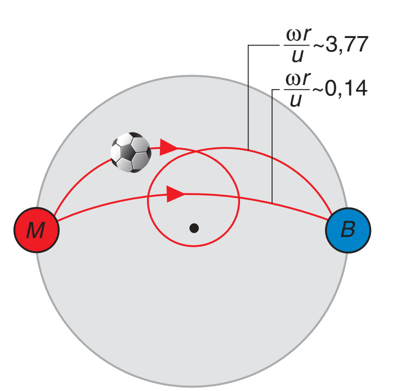
Una pelota no doblará una esquina... salvo que se la lance al aire en un tiovivo. Y la fuerza centrífuga inclina la llama de las velas



En este tiovivo de feria se nota en las propias carnes que la resultante de la gravedad y la fuerza centrífuga va dirigida hacia abajo y hacia afuera

Jugar a pelota en un tiovivo: tenía que hablar en un seminario de la universidad de K. por la tarde, pero los colegas que iban a asistir me citaron ya de buena mañana para que charlásemos. Así que ahora estaba en el sótano de la facultad de matemáticas, sentado en un modesto tiovivo que, dicen, sirve para fines científicos. Su interior, de unos cinco metros de diámetro, estaba protegido de las miradas externas por una cortina opaca. A lo largo de su circunferencia corría un pequeño banco, que sólo se interrumpía en las entradas; el resto del espacio quedaba libre para experimentar. Mi colega M. tomó asiento enfrente de mí con una pelota en la mano, puso en movimiento el tiovivo pulsando un botón y me tiró la pelota. No apuntó directamente hacia mí, sino hacia más adelante, según se movía el tiovivo. La pelota no voló en línea recta y pasó de largo, como me temí en un principio, sino que trazó una elegante curva, de manera que la pude recoger con facilidad. Al devolverla cometí el error de apuntar directamente al señor M. Se desvió del objetivo, inalcanzable.

Esto de pasar la pelota en un tiovivo es más fácil de decir que de hacer, pero se puede aprender. Un observador externo situado justo encima del tiovivo y que no se mueva con él verá que gira con una velocidad angular constante alrededor de su eje y que la pelota se mueve con una velocidad horizontal constante sobre una secante del círculo del tiovivo. Bastan los rudimentos de trigonometría escolares (*véase el recuadro*) para calcular con qué velocidad y con qué ángulo debe tirar la pelota el lanzador para que llegue al compañero.



Para que la pelota no vaya al suelo antes de alcanzar su objetivo debe volar con suficiente velocidad. Su vuelo a través del tiovivo durará sólo una fracción de segundo. Nuestro ojo es demasiado perezoso para poder apreciar detalles en tan poco tiempo; sólo se puede seguir ese movimiento a cámara lenta. En un laboratorio espacial en órbita alrededor de la Tierra, la pelota podría volar con una velocidad todo lo pequeña que se quisiera sin miedo a que cayese. Libre de la fuerza de la gravedad, hasta sería posible que describiese rizos en su camino hacia el receptor; el lanzador incluso podría recibir en otro punto la pelota que él mismo había lanzado (*dibujo de la izquierda*).

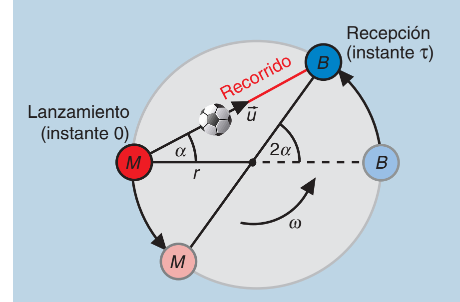
Para el observador que se mueve con el tiovivo, la pelota vuela siguiendo recorridos curvilíneos; en el caso de que la velocidad de la pelota sea pequeña (o la del tiovivo grande), quizá hasta se dé unas vueltas alrededor del eje. Esas trayectorias rizadas son tan "reales" como los torbellinos que giran a favor y en contra de las agujas del reloj cuando en los partes meteorológicos aparecen las zonas de altas y bajas presiones. Y respecto a la Tierra, no hay pelota que vuele exactamente en línea recta; no la habría ni aunque el planeta tuviera una forma esférica ideal y no existiese el menor soplo de viento. La Tierra misma es un tiovivo, con un giro demasiado lento como para poder ejercer un efecto mensurable en el juego de pelota. Cuando en 1851 Léon Foucault puso de manifiesto el giro de la Tierra con su famoso experimento del péndulo en el Panteón de París, la sensación fue grande.

La vela del tiovivo: ¿Cómo arde una vela en un tiovivo en movimiento? ¿Permanece vertical la llama o se ladea a causa de la fuerza centrífuga, como las cadenas del carrusel que se ve en la ilustración? Si se juega en un tiovivo con una pelota, pesada, redon-

La física del tiovivo

El juego de pelota y la fuerza centrífuga

Los jugadores M y B están situados en el perímetro de un tiovivo de radio r que gira con una velocidad angular ω. Para alcanzar B en un tiempo $t = \tau$, M lanza la pelota en el instante $t = 0$ con una velocidad horizontal,



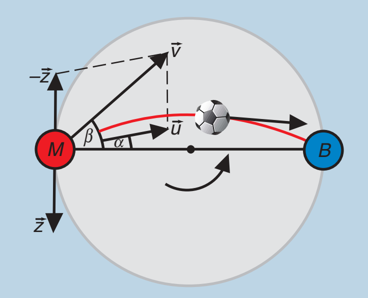
desde el punto de vista de un observador en reposo, $\vec{u}$ que forma un ángulo α con el diámetro (*dibujo superior*). La pelota recorre sobre esta secante en un tiempo τ una distancia $u\tau = 2r \cos \alpha$ (u es el módulo del vector $\vec{u}$) al mismo tiempo que el tiovivo gira un ángulo $\omega\tau = 2\alpha$. (El factor 2 se obtiene de la siguiente ley: en un círculo, el ángulo subtendido en el centro por un arco es el doble que el ángulo desde el perímetro para el mismo arco.) Así que la pelota llegará a su objetivo si u y α cumplen la siguiente condición:

$$\frac{r\omega}{u} = \frac{\alpha}{\cos \alpha}$$

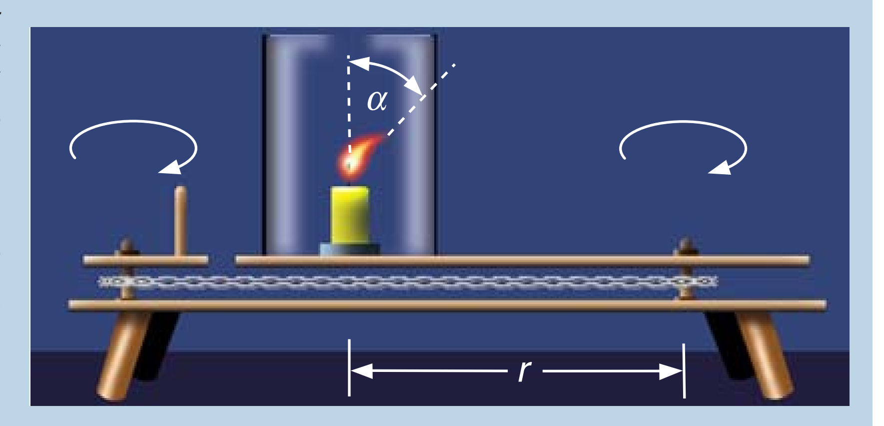
Para recorridos que giran n veces alrededor del eje se ha de sumar un término $n\pi$ al ángulo α.

En el tiovivo, el lanzador no sólo tiene que "apuntar", es decir, lanzar la pelota allá donde el receptor esté al cabo de un tiempo τ, sino que también debe compensar la velocidad $\vec{z}$, con $z = r\omega$, que el tiovivo añade a la pelota al lanzarla. En conclusión, debe lanzar la pelota con una velocidad $\vec{v} = \vec{u} - \vec{z}$. El módulo v y el ángulo β de la velocidad $\vec{v}$ se obtienen de las ecuaciones $v \cos \beta = u \cos \alpha$ y $v \operatorname{sen} \beta = \omega r + u \operatorname{sen} \alpha$ (*dibujo de la derecha*).

Sobre el gas que hay dentro del cilindro que cubre la vela actúa, además de la gravedad mg, la fuerza centrífuga $mr\omega^2$ (m es la masa de una partícula



de gas, g la aceleración debida a la gravedad, r la distancia desde la vela hasta el eje de rotación, ω la velocidad angular). Su razón es la tangente del ángulo de inclinación α de la llama: $\operatorname{tg} \alpha = r\omega^2/g$. Para $r = 0{,}4$ m, $\omega = 2\pi$/s (una vuelta por segundo) y $g = 10$ m/s^2 se obtiene $\alpha \approx 58°$.



da, se podrá ignorar el aire, ya que en recorridos tan cortos no la frenará ni desviará de manera apreciable. Pero la vela, para alimentar su llama, no puede prescindir del oxígeno aportado por la corriente de aire fresco que le viene desde abajo cuando los calientes gases en combustión se escapan hacia arriba. ¿Hasta qué punto afecta el aire del entorno en el tiovivo? ¿Crea éste con su movimiento una brisa de la cual hay que proteger a la vela que se mueve con él, como si luciera al aire libre?

Tales consideraciones me llevaron a montar un tiovivo especial para velas y llevar a cabo un experimento. Sólo posee un brazo de giro; sobre él va la vela, a una distancia de unos cuarenta centímetros del eje de rotación; la protege un cilindro abierto de plexiglás, en el que entra aire a través de unos orificios de la base y del que salen por arriba los gases en combustión, sin que la brisa del movimiento altere o apague la delicada llama. Este tiovivo "mínimo" se mueve a distancia con una manivela gracias a una cadena de transmisión. Así se tiene la posibilidad de jugar con el giro del tiovivo. Atrévase a dar un pronóstico: ¿se inclina la llama? Y si así fuera, ¿lo haría hacia adentro o hacia fuera?

Mi explicación se basa en la suposición de que la corriente ascendente de gas alrededor de la vela es, en esencia, la misma en un tiovivo que se mueva con una velocidad angular constante que en uno quieto. La diferencia estriba en que, además de la fuerza de gravedad orientada hacia abajo, actúa la fuerza centrífuga orientada hacia afuera. Su fuerza resultante tira hacia afuera y hacia abajo, como las cadenas del tiovivo de la ilustración. La llama de la vela se orienta en sentido contrario a esta fuerza gravitatoria aparente, es decir, hacia dentro.

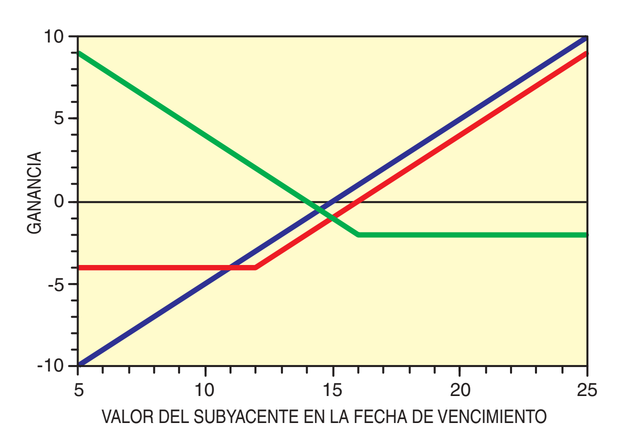
Si el tiovivo gira a una velocidad de una vuelta por segundo, se apreciará claramente una inclinación de la llama de casi sesenta grados. Como los gases de escape están en movimiento, en teoría debería torcerse también la llama a causa de la fuerza de Coriolis, ahora en el sentido del movimiento. Pero este fenómeno es demasiado pequeño como para poder ser observado cuando las velocidades de convección son pequeñas.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Jugar con opciones y futuros

En la bolsa ya no sólo se compran y venden acciones, es decir, participaciones en el capital de las empresas, sino que, desde hace unas cuantas décadas, se intercambian además *productos derivados*, de los cuales los más conocidos son probablemente los contratos de futuros y de opciones. Este mes vamos a presentar un juego que reproduce este mercado. Se debe a David Epstein, un alumno del conocido experto en análisis financieros Paul Wilmott. Pero veamos antes en qué consisten esos productos derivados.



1. Ganancia para el comprador de diferentes contratos en función del valor del subyacente: en azul, un futuro a 15, en rojo una opción de compra (call) *a 12 y con una prima de 4, y en verde una opción de venta* (put) *a 16 con una prima de 2*

Un contrato de futuro es un acuerdo entre dos individuos por el cual uno de ellos (el comprador) se compromete a comprar algo en una determinada fecha futura al otro individuo (el vendedor) y a un precio pactado en el contrato, que se llama *precio de futuro*. Es decir, un contrato de futuro no es más que una venta aplazada, en la que el precio se establece en el momento de realizar el contrato pero la venta no se completa hasta la fecha de vencimiento. Lo que se va a comprar o vender se llama *activo subyacente*, y puede tratarse de acciones que cotizan en bolsa, divisas, oro o incluso naranjas. Siempre se trata de cosas que tienen un precio en algún mercado, ya sea en la bolsa, en el mercado de divisas o en el de cítricos, pero este precio sufre variaciones en principio impredecibles. El futuro es por tanto una apuesta: si en la fecha de vencimiento, el precio del subyacente en el mercado es inferior al precio de futuro, entonces el comprador pierde, porque está obligado a comprar a un precio superior al del mercado. Si el precio del subyacente es alto y supera al precio de futuro, entonces el que gana es el comprador. En la figura 1, la curva azul representa la ganancia del comprador de un futuro a 15 en función del precio del subyacente. La ganancia del vendedor es la misma cambiada de signo.

Los contratos de opciones pueden ser de dos tipos: opciones de compra (*call*) y opciones de venta (*put*). Una opción de compra es un contrato por el cual un individuo (el comprador de la opción) adquiere la opción de comprarle algo (el activo subyacente) a otro (el vendedor de la opción) por un precio y en una determinada fecha acordados en el contrato. Ahora el precio pactado se llama *precio de opción* y, a diferencia de los futuros, el comprador debe pagar al vendedor una cierta cantidad, una *prima* que se pacta entre los dos contratantes. En este caso, en la fecha de vencimiento el comprador no tiene obligación de comprar el subyacente. Por lo tanto, si el precio de mercado del subyacente es inferior al precio de opción, el comprador de la opción no la ejecutará y habrá perdido la prima. Pero si el precio del subyacente es mayor que el precio de opción, entonces el comprador ejercerá la opción de compra y su ganancia en la transacción será la diferencia entre el valor del subyacente y el precio de opción. La ganancia total será entonces el valor del subyacente menos el precio de opción menos la prima, tal y como se muestra en la curva roja de la figura 1 para un ejemplo de opción a 12 con una prima de 4.

En la opción de venta (*put*) ocurre al contrario. El comprador de la opción adquiere, a cambio de la prima, la opción de vender el subyacente. La ganancia del comprador de la opción es ahora mayor cuanto menor sea el precio del subyacente, como indica la curva verde de la figura 1, que representa la ganancia del comprador de una opción de venta a 16 con una prima de 2.

Veamos ahora el juego de Epstein. Para jugar sólo hace falta un dado normal, que marcará el precio del subyacente, y unas cuantas cuartillas y bolígrafos. En la versión original, uno de los jugadores debe ejercer el papel de organizador: decide cuántos turnos habrá en el juego, la duración de los mismos, el tipo de contratos y el precio de las opciones. Actúa también como árbitro de las transacciones y como "animador" del mercado cuando éste presenta poca actividad. Sin embargo, es también posible prescindir del organizador si los jugadores se ponen de acuerdo al principio de la partida acerca de todas estas cuestiones. Un turno consiste en lanzar el dado y a continuación realizar transacciones entre los jugadores durante el tiempo establecido. Cada jugador tiene una tabla en donde se anotan las transacciones realizadas. Una vez que dos jugadores acuerdan una transacción, anotan en su tabla lo siguiente:

Contrato: el tipo de contrato y el precio de opción o de futuro.

Orden: el número de contratos que se compran o venden. Uno de los jugadores necesariamente tiene que comprar y el otro que vender cada uno de esos contratos.

Prima: es nula en el caso de futuros y es la acordada por los dos jugadores si se trata de opciones.

Estas anotaciones se hacen en las casillas azules de la figura 2. Si un jugador rellena una casilla con un acuerdo de compra, otro tiene que rellenar una casilla con la orden de venta correspondiente. De este modo se realizan las transacciones. No hay límite para el número de contratos y la única forma de "deshacerse" de ellos es realizar una nueva operación de venta, aunque probablemente con una prima o precio de futuro diferente.

Las casillas rojas se rellenan al final del juego, cuando se conoce la puntuación total de todas las tiradas del dado, es decir, el valor del activo subyacente. Si llamamos S a ese valor, las anotaciones se hacen de acuerdo con las siguientes reglas:

Liquidación del contrato: En el caso de futuros es la diferencia entre el subyacente y el precio de futuro; en el caso de la opción de compra, es la diferencia entre S y el precio de opción, si ésta es positiva, y cero si el precio de opción es mayor que S; para opciones de venta es la diferencia entre el precio de opción y S, siempre que esta diferencia sea positiva, y es cero si S es mayor que el precio de opción.

Saldo por contrato: Es lo que ganamos o perdemos en cada contrato, contando con la prima que abonamos al comprarlo o que cobramos al venderlo. Si la orden es de compra, entonces el saldo es la diferencia entre la liquidación y la prima (y coincide para cada contrato con las curvas de la figura 1). Si es de venta, entonces es ese mismo número cambiado de signo, es decir, la prima menos la liquidación.

Saldo total: se obtiene multiplicando el saldo por contrato por el número de contratos intercambiados.

Evidentemente, el ganador es el jugador que obtiene una mayor ganancia total al terminar el juego.

Veamos una partida de cuatro turnos y dos jugadores, Alicia y Bruno, en la que se ha decidido al comienzo que haya futuros y opciones de compra y venta con un único precio de opción de 12. Recordemos que en cada transacción los dos contratantes tienen que acordar el precio de futuro y, en el caso de opciones, la prima. Las transacciones de cada jugador están anotadas en sus respectivas tablas, que se muestran en la figura 2. En el primer turno sale un cinco en el dado. Como quedan otras tres tiradas, el valor esperado del subyacente al final de la partida es 5 + + 10,5 = 15,5 (el valor esperado de una tirada de dado es 3,5). Bruno confía en que las puntuaciones posteriores del dado sean altas y decide ofrecer cinco opciones de venta con una prima de 3 que Alicia acepta. En el segundo turno sale un dos y ahora las previsiones para el subyacente cambian a la baja: el nuevo valor esperado es 14. Para contrarrestar posibles pérdidas si el valor del subyacente baja demasiado, Bruno aprovecha la ocasión para ofrecer futuros a 14 y la transacción se completa, junto con 10 opciones de compra que Alicia vende con una prima de 2. Finalmente, en el último turno, después de salir un cuatro en el dado, Alicia consigue "deshacerse" de estas 10 opciones de compra, pero esta vez, ya que la puntuación del dado ha sido ligeramente superior a la media, tendrá que pagar una prima mayor.

Un buen jugador ha de tener la habilidad de saber fijar la prima de las opciones. En realidad, es posible calcular la liquidación media de un contrato de opción y con ella conocer la prima más justa. Un programa de ordenador puede hacer esta tarea, calculando las probabilidades de todas las posibles tiradas del dado. Por ejemplo, para una opción de venta a 12 cuando quedan dos tiradas y el subyacente vale en ese momento 7, el "precio justo" sería de 2,28. Una posible variación del juego es contar con este programa y calcular con él las primas. ¿Es posible, incluso utilizando sólo "transacciones justas", diseñar estrategias que venzan al contrincante?

Los precios, primas y fechas de vencimiento de los derivados de verdad se detallan en cualquier periódico. Pero tengan cuidado: en la vida real, calcular el precio de una opción es bastante más complicado. Robert Merton y Myron Scholes ganaron el Nobel de economía en 1997 por elaborar, junto con el fallecido Fischer Black, una teoría para el cálculo de la prima de los productos derivados, la *ecuación de Black-Scholes*. Esta ecuación, junto con variantes que han aparecido posteriormente y siguen apareciendo, es utilizada por los analistas de los mercados financieros. Pero también hay que recordar que algunos de estos analistas, armados de todo este bagaje teórico, han conducido a grandes fondos de inversión a sonoras bancarrotas.

ALICIA

CONTRATO	ORDEN	PRIMA	LIQUIDACION DEL CONTRATO	SALDO POR CONTRATO	SALDO TOTAL
PUT 12	COMPRAR 5	3	0	0 – 3 = –3	–3 × 5 = –15
FUTURO 14	COMPRAR 10	0	17 – 14 = 3	3 – 0 = 3	3 × 10 = 30
CALL 12	VENDER 10	2	17 – 12 = 5	2 – 5 = –3	–3 × 10 = –30
CALL 12	COMPRAR 10	3	17 – 12 = 5	5 – 3 = 2	2 × 10 = 20
			GANANCIA TOTAL		5

BRUNO

CONTRATO	ORDEN	PRIMA	LIQUIDACION DEL CONTRATO	SALDO POR CONTRATO	SALDO TOTAL
PUT 12	VENDER 5	3	0	3 – 0 = 3	3 × 5 = 15
FUTURO 14	VENDER 10	0	17 – 14 = 3	0 – 3 = –3	–3 × 10 = –30
CALL 12	COMPRAR 10	2	17 – 12 = 5	5 – 2 = 3	3 × 10 = 30
CALL 12	VENDER 10	3	17 – 12 = 5	3 – 5 = –2	–2 × 10 = –20
			GANANCIA TOTAL		–5

2. Ejemplo de un juego con cuatro turnos en donde las tiradas han sido 5, 2, 4 y 6. El valor final del subyacente es la suma, es decir, 17

Mark Fischetti

Candados de combinación

"Hoy, al abrir la taquilla del gimnasio", nos escribe un lector, "me di cuenta de que no tengo la menor idea de cómo funciona un candado de combinación corriente y moliente. Hace docenas de años que los uso. ¿Por qué al girar el dial 'a la derecha, a la izquierda y otra vez a la derecha' se abre el candado?"

La respuesta estriba en un diseño ingenioso, pero muy sencillo. Al rotar el dial adelante y atrás giran tres discos en el interior. Cada uno tiene una muesca. Cuando se alinean, se libera el trinquete del candado. En un candado normal, de la casa Master Lock, la combinación consta de tres números, uno por cada disco. La muesca de un disco puede ocupar 40 posiciones posibles; por tanto, cada dial tiene 40 números y hay 64.000 combinaciones posibles: 40 por 40 por 40.

Los candados de combinación son los más frecuentes en colegios, gimnasios y lugares de trabajo. Pueden mantener a enemigos, y a amigos, lejos de nuestras pertenencias, pero no hay que engañarse. Según Steve Fantl, jefe técnico de Master Lock (Milwaukee), el mayor suministrador de candados de combinación de EE.UU., en muchos de esos lugares se guarda una tabla con las combinaciones de las taquillas o se emplean candados que llevan en el reverso un mecanismo de apertura con llave maestra con el que los encargados pueden abrir cualquier taquilla.

Un buen candado puede durar años. El trinquete de una Master Lock se hace de acero templado. El dial, ciertos discos internos y la palanca de inmovilización, sin embargo, son de zinc electrolítico, que se moldea con matriz. Cuando esas piezas están expuestas mucho tiempo a la humedad pueden corroerse. Si el candado de su vieja bicicleta está agarrotado, pruebe a inyectarle un poco de aceite contra la herrumbre.

Las cerraduras de combinación que protegen las cajas de caudales de pared y las cámaras acorazadas de los bancos son mucho más refinadas. ¿Por qué vemos tantas veces en las películas a delincuentes que descifran las combinaciones, como por arte de magia, con estetoscopios o chismes computerizados? "Cosas del cine", nos dice Fantl. ¿Y por qué la mayoría de los candados tienen una combinación de tres números? "Dos números dan pocas combinaciones", explica, "y según estudios que se han hecho, a la mayoría le cuesta demasiado recordar cuatro".



EL CANDADO. Un muelle mantiene en posición dos discos giratorios. Un tercer disco es solidario del dial. En cada disco hay una muesca, así como un tetón que corresponde a un número del dial. Al alinearse las tres muescas puede liberarse el trinquete.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ EL MAESTRO: El cerrajero Harry Soref fundó Master Lock en 1921, en Milwaukee. Con capas de acero laminado construyó un candado macizo, más robusto que los candados huecos que se usaban por entonces. Su oportunidad se presentó en 1928, durante la Prohibición, cuando unos agentes federales de Nueva York le encargaron 147.600 candados para cerrar establecimientos que vendían bebidas alcohólicas. Harry Houdini le consultó acerca de las llaves que podría usar para librarse de las esposas que le ataban las manos en sus actuaciones. (Se dice también que Soref fue el primero en usar como llavero una cadena de cuentas de las que sirven para encender las lámparas.)

➤ PEQUEÑO PERO SEGURO: Los ingenieros de los Laboratorios Nacionales de Sandia han construido un diminuto candado de combinación microelectromecánico (*micrografía, abajo*). Está dotado de seis ruedas de espigas, apiladas en serie, cada una de menos de 300 micras de ancho. El usuario marca con un teclado seis dígitos, del 0 al 9. Si la clave es correcta se envía un impulso eléctrico a un actuador electrostático que rota la rueda 1, luego la 2 y así sucesivamente. Si las muescas de las ruedas se alinean adecuadamente, se abre un brazo de palanca. Según el laboratorio, un ladrón tiene una probabilidad de uno sobre un millón de abrir el candado; además, un número incorrecto lo bloquea. Puede que el laboratorio use este candado en sistemas de control de armas.

➤ ¿CUAL FORZAR?: Para forzar un candado o cerradura de llave, los cerrajeros y los ladrones introducen una palanca fina con la que aplican al cilindro una leve tensión lateral. A continuación introducen una ganzúa curva que empuja cada pasador hacia la línea de cizalla. Sometidos a la tensión correcta, los pasadores quedan en posición. Cuando todos están en la línea de cizalla, el cilindro gira por completo y se abre el candado. No es fácil llegar a los discos de un candado de combinación para forzarlo.

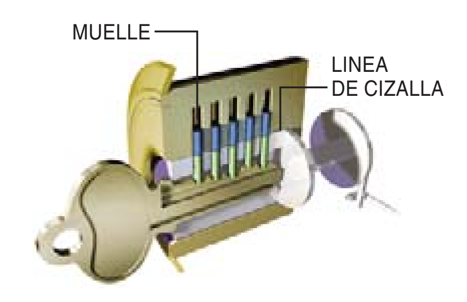


PASO 1. "Déle al dial dos o más vueltas a la derecha y pare en 20." Con esto, el tetón del dial se acopla con los otros dos tetones de modo que los discos rotan a la vez. Al parar en 20, la muesca del primer disco se pone en la posición de escape adecuada.

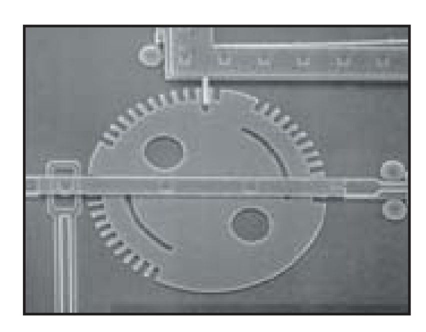
PASO 2. "Gire el dial a la izquierda una vuelta completa a partir del número anterior y pare en 38." Así se elimina la presión del tetón del primer disco, pero se empuja al tetón del segundo disco hacia la izquierda cuando el tetón del dial retorna. Al girar hasta 38 la muesca del segundo disco se alinea con la del primer disco.

PASO 3. "Gire el dial a la derecha y pare en 24, luego tire para abrir el trinquete." Así vuelve a eliminarse la presión del tetón. Al parar en 24 se alinea la tercera muesca. Al tirar del trinquete se hace girar una palanca de inmovilización, con lo que el trinquete se libera. Al empujarlo hacia dentro, en cambio, la palanca rota y traba el cierre del trinquete; se empuja además un brazo excéntrico, que hace rotar el primer disco y desorganiza la alineación.

LA CERRADURA DE LLAVE COMUN se abre cuando el cilindro central puede girar. Los muelles alojados en los pequeños caños empujan hacia abajo a pares de pasadores que se introducen en el cilindro y lo sujetan. Pero una llave con el dentado adecuado empuja hacia arriba los pasadores justo lo suficiente para que el conjunto de los pasadores superiores se enrasen con la línea de cizalla; puede así girar el cilindro para abrir el pestillo de una puerta, soltar el trinquete de un candado o activar el encendido de automóvil.



EL CANDADO MICROELECTROMECANICO construido por los Laboratorios Nacionales de Sandia mide menos de 300 micras de diámetro.



LIBROS

El hombre

Sus orígenes

PRIMATE ORIGINS OF HUMAN COGNITION AND BEHAVIOR. Dirigido por Tetsuro Matsuzawa. Springer Verlag; Tokio, 2001. **AUX ORIGINES DE L'HUMANITÉ. LE PROPRE DE L'HOMME.** Dirigido por Pascal Picq e Yves Coppens. Fayard; París, 2001. **JAVA MAN. HOW TWO GEOLOGISTS CHANGED OUR UNDERSTANDING OF HUMAN EVOLUTION,** por Carl C. Swisher III, Garniss H. Curtis y Roger Lewin. The University of Chicago Press; Chicago, 2001.

THE MONKEY IN THE MIRROR. ESSAYS ON THE SCIENCE OF WHAT MAKES US HUMAN, por Ian Tattersall. Oxford University Press; Oxford, 2002. **SENDEROS DE LA EVOLUCIÓN HUMANA,** por Camilo José Cela Conde y Francisco J. Ayala. Alianza; Madrid, 2001.

WHERE DO WE COME FROM? THE MOLECULAR EVIDENCE FOR HUMAN DESCENT, por Jan Klein y Naoyuki Takahata. Springer Verlag; Berlín, 2002. **SECOND NATURE: ECONOMIC ORIGINS OF HUMAN EVOLUTION,** por Haim Ofek. Cambridge University Press; Cambridge, 2001.

Del eslabón perdido todavía se habla... salvo en paleontología. Fue la obsesión de los primeros darwinistas, que cifraban en él la prueba inapelable del *continuum* evolutivo defendido. En su *Historia de la creación*, publicada en 1868, Ernst Haeckel escalonaba el decurso de la vida en la Tierra en 22 estadios, que comenzaban con los organismos elementales y culminaban con el hombre. Distinguíase éste por su andar erguido, cerebro voluminoso y dominio del lenguaje. Entre los grandes simios, instalados en el estadio vigésimo, y el hombre actual, mediaba un eslabón que había adquirido todas las cualidades del último, menos el habla. Haeckel llamó a ese grado oculto *Pithecanthropus alalus*, literalmente simio-hombre que no habla.

Pero decididos a desenterrarlo, ¿por dónde empezar? Las Indias Orientales Holandesas, rememora *Java Man*, constituían un lugar atractivo. La paleontología decimonónica abonaba la idea de que los animales actuales ocupaban las mismas regiones geográficas que sus antepasados. Hombres y simios, con el vacío interpuesto, tuvieron que compartir un parejo entorno: los trópicos. Allí la pérdida del pelo protector no suponía, además, ningún riesgo para el hombre. Darwin sospechaba que la cuna de la humanidad se escondía en Africa, donde vivían chimpancés y gorilas, los antropomorfos que creía más cercanos al hombre. Alfred Russel Wallace, coautor de la tesis de la selección natural, apostaba por el sureste asiático, patria de orangutanes y gibones.

Se guiaban por evidentes afinidades anatómicas. Mas, junto a la morfología, razón inicial de la inclusión del hombre entre los primates, de un tiempo a esta parte viene cobrando particular interés el estudio del comportamiento, reflejo de un origen común (*Primate Origins of Human Cognition and Behavior* y *Aux Origines de l'Humanité*), al par que queda resaltada la singularidad de nuestra especie. Cierto es que la conducta varía a menudo en el seno de un mismo género. Los macacos *rhesus* viven en sociedades muy despóticas, con unas relaciones jerárquicas y asimétricas; entre los macacos de las Célebes (*Macaca tonkeana*), por el contrario, los machos se muestran muy tolerantes, escasean los conflictos, se restablece pronto la armonía y presentan una expresión facial tranquilizadora. El medio, sin embargo, puede moldear las tendencias genéticas. En un experimento esclarecedor, Frans de Waal colocó juntos un grupo de macacos de larga cola despóticos (*M. mulatta*) y otro de macacos de cara roja (*M. arctoides*); tras una prolongada cohabitación, los primeros aprendieron a comportarse de una manera más amistosa con sus congéneres, sin perder sus impulsos característicos.

Las limitaciones biológicas terminan siempre por imponerse. Los monos capuchinos poseen un coeficiente de encefalización similar, si no superior, al del hombre. (Tienen un cerebro grande en relación con la talla corporal.) Resuelven con facilidad tareas que requieren el concurso de herramientas, viven en grupo y consumen alimentos de muy buena calidad. Carecen, no obstante, de tradiciones. Cada individuo reinventa por sí mismo los gestos implicados en la solución de ciertos problemas. Pese a tales facultades, no gozan de las posibilidades cognitivas que favorecen el asentamiento de comportamientos culturales (empatía, atención, observación y similares). Suelen atribuirse tales limitaciones a la brevedad de su período de infancia y adolescencia en comparación con el de los grandes antropomorfos y el hombre. Son superdotados que no han tenido tiempo de aprender. Además de capacidad receptiva, el aprendizaje requiere tiempo. A las restricciones biológicas cabría también imputar el precoz estancamiento de la comprensión del lenguaje de los chimpancés; aunque, estimulados y adiestrados, pueden alcanzar los sorprendentes resultados obtenidos con Ai, que asocia a su símbolo arábigo correspondiente un número determinado de puntos (inferior a diez), dispersos sobre un panel.

Con los chimpancés en particular compartimos algunas expresiones de conducta, pues no en vano nos igualamos en un 98,3 por ciento de nuestras respectivas secuencias de ADN y hace apenas seis millones de años nos precedió un antepasado común. En las distintas sociedades humanas, nos enseña la antropología cultural, la mujer deja el grupo natal para unirse al de su marido; son sociedades patriloca-

les. En la mayoría de las sociedades de los simios, si exceptuamos chimpancés, bonobos y alguno más, las hembras permanecen juntas toda la vida; los machos emigran hacia el final de la adolescencia en esas sociedades matrilocales. Merced a la exogamia de uno de los sexos queda conjurado el problema del incesto.

Hasta una cuarentena de comportamientos culturales (risa, ritos de aseo, técnicas de caza de termites y hormigas, empleo de herramientas, estrategias de seducción, refinamiento en la comida, etcétera) se han observado en comunidades de chimpancés. Para su estudio, la escuela de primatología japonesa, iniciada a mediados del siglo pasado por Kinji Imanishi y Jun'ichiro Itani, ha venido sometiendo a ratificación experimental las observaciones esporádicas. Si de acuerdo con éstas los chimpancés utilizan hojas para recoger agua, palillos para extraer hormigas y piedras para cascar nueces, se coloca a los simios en un entorno preparado para que acometan esa triple operación.

Eclipses

TOTAL ECLIPSES. SCIENCE, OBSERVATIONS, MYTHS AND LEGENDS, por Pierre Guillermier y Serge Koutchmy. Springer Verlag; Berlín, 1999.

Los eclipses totales de Sol y de Luna son fenómenos naturales y grandiosos. Los de Sol, en particular, nos ofrecen espectáculos mágicos e inolvidables, y la oportunidad para los astrónomos y astrofísicos de avanzar en el conocimiento de nuestra estrella más cercana.

La obra de Pierre Guillermier y Serge Koutchmy está enteramente consagrada a los eclipses, a su estudio y observación. Guillermier es astrofotógrafo y cazador de eclipses; Koutchmy, astrofísico especializado en la física de la corona solar. El primer capítulo aborda los conocimientos actuales sobre el Sol (completado con un par de apéndices). La física de la corona, así como también la actividad y los ciclos solares, reciben un tratamiento diáfano, para terminar con una reseña completa de las últimas misiones espaciales hacia el Sol. Así, nos enteramos de los detalles de misiones como SOHO y TRACE, e incluso el lamentable fin, ocurrido el 4 de junio de 1996, de la misión europea Cluster; ésta era una flotilla de cuatro satélites para el estudio del comportamiento del campo magnético terrestre que debía ser colocada en órbita por el cohete Ariane 5. Sin embargo, una deficiencia del sistema de direccionamiento, debida a un error de programación en lenguaje C, obligó a los controladores de vuelo a apretar el botón rojo y destruir la nave.

Los dos siguientes capítulos del libro nos enseñan a mirar el Sol (con las debidas precauciones) y a comprender el mecanismo y la previsión de los eclipses de Sol y Luna. Se detalla el equipamiento necesario para estudiar el Sol y se explica el origen de fenómenos solares como la luz zodiacal, las manchas solares y hasta el "rayo verde", que fuera inmortalizado por la novela de Julio Verne. Los eclipses de Sol permiten mejorar la datación de eventos sobresalientes del pasado (como la muerte del emperador de Occidente Luis el Piadoso, hijo de Carlomagno) y además, como en el caso del eclipse registrado en Babilonia el 15 de abril de 136 a.C., son de gran utilidad en el estudio de las irregularidades de la rotación terrestre ocasionadas por las fuerzas de marea.

En la obra se detallan los principales avances técnicos, como el espectroheliógrafo de Hale y Deslandres o el coronógrafo de Lyot, que aceleraron de forma crucial el advenimiento de observaciones precisas del Sol. Previsiones reales de eclipses de Sol no verán la luz sino después de Hiparcos, en el siglo y medio previo al comienzo de nuestra era. Aun así, se deberá esperar hasta el *Almagesto* de Ptolomeo, 300 años más tarde, para lograr la precisión que sólo el conocimiento del movimiento complejo de la Luna y los diámetros aparentes de ambos astros puede otorgar.



La mezquita de estilo clásico otomano del Sultán Ahmet en Estambul en ocasión del eclipse de Sol del 11 de agosto de 1999

Los capítulos finales se dedican a la observación propiamente dicha de un eclipse de Sol; allí uno conocerá el origen de las bandas de sombra, las cuentas de Baily y demás curiosidades que constituyen el placer de la observación amateur. Encontramos además una buena síntesis de técnicas fotográficas.

A un texto equilibrado y claro se le suman más de 120 figuras en blanco y negro, y 8 planchas en color de buena resolución. Un par de apéndices ofrece una lista de referencias de lectura y programas de computadora recomendados, así como las direcciones de observatorios y planetarios. Se dan también los detalles de futuros eclipses hasta el año 2010, y direcciones Internet en donde podrán encontrarse imágenes, más información y predicciones para muchos años más.

ALEJANDRO GANGUI
Universidad de Buenos Aires

Antes de que se reparase en los hábitos culturales de los antropomorfos, el bipedismo y la capacidad craneana constituían, en determinados medios, el último refugio de la distinción entre el hombre y otras especies. Pero chimpancés y bonobos son bípedos ocasionales y, en menor medida, gibones y orangutanes. Los antropomorfos despliegan un amplio repertorio locomotor: suspensión, cuadripedia, trepa vertical y bipedia. En cambio, el hombre moderno sólo conoce dos modos de desplazarse: la marcha y la carrera; la alternancia del balanceo de los brazos y las piernas asegura un equilibrio dinámico y armónico en torno al centro de gravedad.

El cerebro del chimpancé alcanza unos 380 centímetros cúbicos, en tanto que el del hombre se cifra en torno a los 1400 cc. Aunque lo importante es el índice de encefalización, en razón del cual el hombre supera a la mayoría de los primates. Y si bien el cerebro del chimpancé encierra, en proporción, mayor número de neuronas que el del hombre, las conexiones entre las mismas y la complejidad de las redes establecidas señalan un salto espectacular de aquél a éste.

¿Cómo evolucionó el cerebro de los homínidos hasta llegar al hombre actual? De acuerdo con el registro fósil se produce un aumento persistente del volumen, empezando por los australopitecos, que vivieron hace de tres a cuatro millones de años. El cerebro de *Australopithecus afarensis* variaba entre 350 y 400 cc. Se advierte un desarrollo relativo de las áreas parietales, allí donde se establecen las transferencias cognitivas entre las áreas sensorio-motoras primarias y secundarias. Con sus 450 cc, el cerebro de *A. africanus* registró cierto avance. Mayor organización se advierte en la capacidad craneana (500-550 cc) de los parántropos; el estudio del endocráneo revela claras simetrías entre hemisferios, indicio de una lateralización de las funciones cerebrales. *Homo habilis* (550-650 cc) y *H. rudolfensis* (650-750 cc) han aumentado el grado de encefalización, intensificado las asimetrías y desarrollado un área de Broca (en el lóbulo temporal) y un área de Wernicke (en el lóbulo parietal).



El gesto zumbón del antropomorfo revela que comparte con el hombre un antepasado común

Al par que gana en corpulencia, el poderoso cerebro de *Homo robustus*, con sus 1000 cc en promedio, está capacitado para inventar bifaces, dominar el fuego y construir habitáculos, no meros nidos como los primates actuales. La línea del progreso pasa por *H. heidelbergensis* (1000-1300 cc) y arriba a *H. neandertalensis* (1600 cc). A cada incremento volumétrico acompaña un mayor dominio del medio en provecho propio. En las últimas formas reseñadas encontramos expresiones de un pensamiento simbólico, evidenciado en los abalorios, mobiliario funerario, arte y otros. Las poblaciones actuales de nuestra especie poseen un cerebro algo menor que el de sus inmediatos neandertales y cromañones. Disminución que algunos relacionan con la gracilidad de nuestro cuerpo.

¿Quiere ello decir que se ha resuelto el problema de la filogénesis humana? La paleoantropología ha sufrido una profunda transformación en los dos últimos decenios (*The Monkey in the Mirror* y *Senderos de la evolución humana*). Todavía en los años sesenta se daba por descontado que la evolución humana había seguido un proceso lineal: a lo largo de los milenios *Australopithecus* había dado origen a *Homo robustus,* que había dado origen a *Homo sapiens*, bajo el impulso determinante de una selección natural darwinista. La cladística, con su distinción entre estados de carácter primitivos y estados de carácter derivados, se convirtió en el método sistemático de los nuevos planteamientos. Por estados de carácter primitivos se entienden las notas presentes ya en el último antepasado común del grupo; los derivados son los peculiares de los individuos en cuestión. Las relaciones de parentesco inferidas se representan en diagramas de ramificación, en cladogramas. Ese planteamiento favorece una interpretación distinta de los taxones. Los homínidos no son ya humanos primitivos más o menos toscos, comparados con el hombre actual, sino entidades conclusas en sí mismas. En mostrarlo se empeñan los ensayos de Tattersall y el volumen, documentada y rigurosa-

mente trabado, de Ayala y Cela.

El debate paleontológico actual se centra en tres aspectos cruciales: los primeros homínidos, la importancia clave de *Homo erectus* y la aparición del hombre moderno. Desde 1973, año en que se descubrió, y a lo largo de dos decenios, Lucy señalaba el punto cero de la evolución de nuestro linaje. Esa hembra, del tamaño de un chimpancé, brazos largos, cerebro pequeño, grandes molares, caninos pequeños, y sólido esmalte dentario, pertenecía a la especie *Australopithecus africanus*, que se paseó erguida por los matorrales de Africa oriental hace entre 3 y 3,6 millones de años. Se alimentaba de raíces, tubérculos, insectos y animales de escasas proporciones.



Hombre de Java

Tal primogenitura comenzó a tambalearse en 1992. Ese año se descubrían en Aramis, cerca de la depresión afarense de Etiopía donde se había hallado Lucy, restos fósiles de un primate de unos 4,4 millones de años. Las piezas, dentarias sobre todo, mostraban una mezcolanza de rasgos primitivos y avanzados. Se le llamó *Ardipithecus ramidus*. La excavación posterior recuperó casi la mitad de un esqueleto. A la espera de la publicación de su investigación, lenta en razón de la fragilidad de las muestras, se supone que encierra la clave de la bipedia en coherencia con lo observado en *A. ramidus kadabba*, una subespecie más antigua (de hace 5,2-5,8 millones de años), que presenta algunos rasgos exclusivos de los que caminan erguidos. Más antiguo aún, de 5,7 a 6,1 millones de años, es *Orrorin tugenesis*, recuperado en la formación Lukeino, de Kenia, de andar bípedo según se desprende de los tres fémures conocidos. De pareja antigüedad sería el cráneo de Chad, homínido por lo que parece, aunque no se han hecho públicos todavía los resultados de las investigaciones. De no menor calado es la comprobación, ratificada por el análisis químico de los suelos y la constitución dentaria, de que esos homínidos vivieran en bosques de ribera o en márgenes de estepas; dicho de otro modo, la bipedia no estuvo directamente relacionada con la sabana.

Un proyecto inacabado

La Fundación Nacional para Investigaciones Científicas (1931-1939). Actas del Consejo de Administración y Estudio Preliminar, por Justo Formentín Ibáñez y Esther Rodríguez Fraile. CSIC; Madrid, 2001.

En los primeros años de la década de 1930 se creaba en España la Fundación Nacional para Investigaciones Científicas y Ensayos de Reformas al amparo de la ya veterana Junta para Ampliación de Estudios. La llegada de la Guerra Civil cortó de raíz sus apenas esbozados proyectos, que, junto con la propia institución, cayeron muy pronto en el olvido.

En el volumen que recensionamos, sus dos autores —vinculados al Consejo Superior de Investigaciones Científicas— hacen un amplio estudio de la institución y sobre su significado en el desarrollo científico y cultural de aquellos momentos. A la hora del balance y para no caer en simplismos e inexactitudes, hay que detenerse más en el ámbito de sus proyectos que en el de sus realizaciones. Su corta vida es determinante. Apenas fueron cinco los años dedicados a intentar implantar en España una infraestructura científica, por lo que es lógica la ausencia de resultados tangibles. No se creó, sin embargo, con esta vocación de brevedad pese a la precaria estabilidad política y social.

Se planteó unos amplios objetivos, para los que contaba con el apoyo del nuevo Gobierno, queriendo abarcar todos los campos del quehacer científico e impulsando cualquier iniciativa mínimamente interesante. Pero su falta de concreción inicial provocó que se convirtiese en un mero dispensario de fondos para proyectos desamparados: fueron muy pocos los centros creados por ella comparados con las iniciativas ya existentes que subvencionó para que salieran adelante. Esta financiación la realizó siguiendo unos criterios estrictamente científicos, intentando cubrir áreas tales como la ciencia aplicada, la cooperación con las industrias y administraciones locales y la descentralización, que acercó la investigación a las zonas alejadas y marginadas por ellas.

No había ninguna monografía específica sobre esta Fundación, si bien hay información acerca de ella en los trabajos referidos a la figura de José Castillejo, considerado comúnmente como su impulsor, así como alguna referencia en obras centradas en el análisis de la situación de la investigación y de la ciencia españolas en aquellos años. Por lo tanto, ésta ya es una interesante aportación del volumen a la historia de la ciencia española. Además brinda la transcripción del *Libro de Actas* —que abarca desde su primera sesión el 24 de octubre de 1932 hasta la celebrada el 11 de enero de 1937— de su Consejo de Administración, que permanecían hasta ahora inéditas y, por consiguiente, eran poco conocidas por los especialistas.

—Alfonso Esponera Cerdán

Los griegos y el mar

THE ATHENIAN TRIREME. THE HISTORY AND RECONSTRUCTION OF AN ANCIENT GREEK WARSHIP, por J. S. Morrison, J. F. Coates y N. B. Rankov. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

A partir de la reconstrucción de *Olympias*, los autores nos acercan al mundo naval griego. Fruto de la evolución de la canoa monóxil y de la *navis longa*, la trirreme era tan ligera de peso, que podía transportarse por el istmo de Corinto. Desempeñó un papel protagonista de la historia naval desde Homero hasta Constantino, y fue la ascendiente, a partir del s. IV a.C., de unidades de mayor rango.

El *trierarca*, que mandaba la nave de 200 tripulantes, era el único que disponía de un espacio de acomodación bajo cubierta. Entre los tripulantes se recuerda al *auletes* o músico, con cuyo instrumento se llevaba el ritmo de la boga, y al *keleustes* o cómitre, que era el encargado de dirigirla. La dotación de remeros se distribuía en grupos de tres, formados por los llamados tranitas, zigitas y talamitas, en los tres órdenes característicos, es decir, en las tres posiciones de altura sobre la quilla y distancia al costado oportunas.

La nave ajustaba robustez y ligereza para alcanzar unas condiciones de flotabilidad y navegabilidad adecuadas, es decir, que no se partiera en dos en caso de navegar con oleaje, tuviera capacidad de adrizarse en las escoras o bandazos a causa de las olas. Los autores explican lo relativo al aparejo, jarcia y velamen, remos —de dos tipos— y demás elementos del casco, incluyendo las piezas características de su estructura —quilla, roda, codaste, varengas, cuadernas y baos, entre otras—, del forro y de la cubierta, como son la postiza, el asiento de los remeros y las peañas donde apoyaban los pies para hacer fuerza al bogar, los dos timones laterales y el espolón. Las *askomata*, o capas de cuero, cubrían las aberturas del casco por donde pasaban los remos de los talamitas para impedir la entrada de agua; el *hypozomata*, o tortor de cabo, iba dispuesto en el plano diametral del casco, extendiéndose de proa a popa y siendo un gran elemento de refuerzo del barco en sentido longitudinal.

Las trirremes, que alcanzaban una velocidad de 8,6 nudos, arbolaban dos palos que solían dejarlos en tierra, junto con las velas, antes de entrar en combate. Los griegos empleaban dos tácticas militares principales: el *periplous*, o rodeo de la flota enemiga y ataque por la popa, y el *diekplous*, o paso entre sus componentes y ataque por el costado.



Reconstrucción de la trirreme Olympias. *(Fotografía Alexandra Guest)*

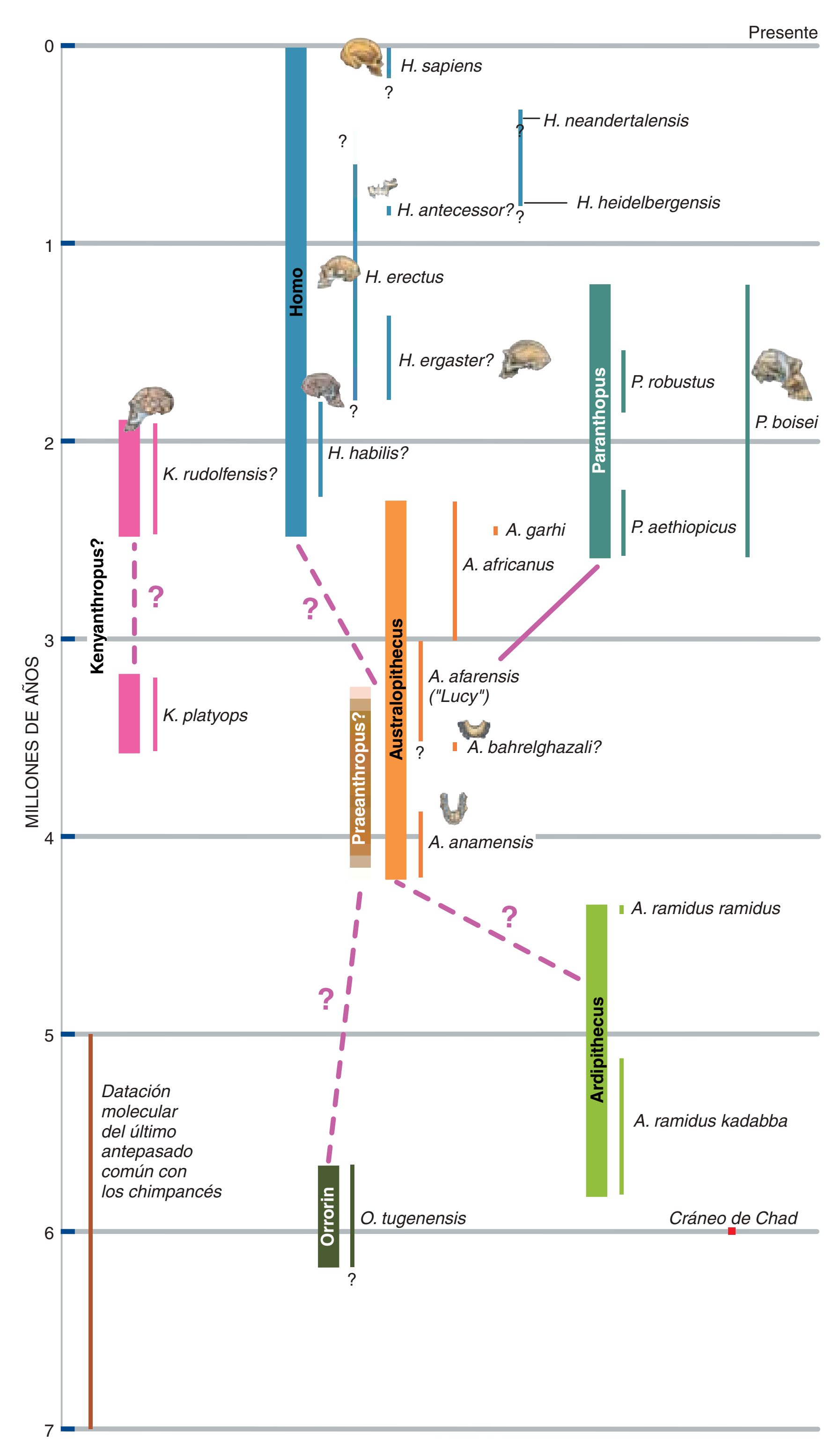
—LAUREANO CARBONELL RELAT

En las riberas del lago Turkana se encontró lo que pudiera ser el antepasado directo de Lucy, *A. anamensis*, un australopitecino de 3,9-4,2 millones de años, que se alimentaba de frutos, insectos, micromamíferos, huevos de ave, capaz de trepar a los árboles. También comía gramíneas, lo que indica su incursión en campo abierto. Progresión hacia la sabana que aparece con nitidez en *Kenyanthropus playtops*, de hace 3,5 millones de años.

Hace 1,8 millones de años entró en escena un nuevo homínido, *Homo erectus*, que habitó en Africa y en Eurasia. Ha dejado de ser simio sin podérsele reputar plenamente humano. En numerosos aspectos de anatomía y comportamiento, todas las especies anteriores evidenciaban una afinidad con los simios. Todas las especies que le sigan se mostrarán distintivamente humanas en morfología, vida social y economía. De altura equiparable a la media actual, notable volumen cerebral, largas extremidades inferiores y cortas las superiores, diestro en manejar la piedra y carroñero en sabana abierta. Para unos paleoantropólogos se trataba de una especie distinta de *Homo ergaster*; otros sostienen que es la misma. Los segundos se apoyan en el descubrimiento de un cráneo etíope que presenta rasgos comunes con otros fósiles algo anteriores de Africa (Turkana) y con otros algo posteriores de Asia (Java), reflejo, pues, de una suerte de especie plástica que, además, dio origen a los humanos modernos.

La tercera cuestión que polariza el debate paleontológico contemporáneo gira en torno a los caracteres distintivos que han conformado al hombre moderno. La mayoría acepta que el hombre de tipo moderno surgió hace de 100.000 a 200.000 años en Africa, para diseminarse luego; los menos proponen la hipótesis multirregional o de evolución simultánea en distintas partes. En cualquier caso, ¿cuáles son los criterios para distinguir un cráneo moderno de otro arcaico? En el hombre de tipo moderno, la cara y los ojos están alojados bajo la caja craneana, sin el prognatismo de las demás especies humanas extintas; cráneo que es glo-

Cuadro actual, lleno de interrogantes, de la evolución de los homínidos



bular, no oblongo. A esos dos caracteres podrían reducirse las demás notas distintivas. Tal reconfiguración facilitó la expansión de los lóbulos parietal y temporal. Además, pudo producirse, en un intervalo temporal breve, mediante pequeños reajustes en unos pocos huesos de la base del cráneo, instados por cambios genéticos (*Where Do We Come From? The Molecular Evidence for Human Descent*).

No es fácil, sin embargo, trabajar con ADN "fósil", e imposible abordarlo más allá de una antigüedad superior a los 100.000 años. En 1987 Allan Wilson proponía en un polémico artículo que la transformación de formas arcaicas de *Homo sapiens* en formas anatómicamente modernas se produjo hace unos 140.000-100.000 años, apoyándose en pruebas de ADN mitocondrial. De su examen se infería que se había dado una plena sustitución de las poblaciones arcaicas por la moderna africana (hipótesis de la "Eva mitocondrial"). El ADN circular de las mitocondrias se hereda de la madre, lo que posibilita una reconstrucción más directa del curso evolutivo que el ADN nuclear; además, la tasa de mutaciones del mitocondrial decuplica la del nuclear, convirtiéndose así en un reloj más célere para computar los acontecimientos recientes. Ayala y otros rechazaron tal hipótesis. Como alternativa más sólida se ha avanzado la hipótesis del "Adán *ZFY*". En el cromosoma Y hay regiones que no son homólogas con el cromosoma X; dicho de otro modo, se transmiten sólo por línea paterna. Tras el hallazgo reciente de un gen presumiblemente implicado en el habla, importa ahora determinar si experimentó alguna mutación coetánea con la aparición de *Homo sapiens*.

Por fin, la rápida instauración del hombre moderno vendría corroborada por la técnica asociada. Puesto que una especie es lo que hace, la arqueología certifica que los cambios bruscos en la cultura material no se registra hasta muy avanzada la aparición de la anatomía moderna. Para algunos, las pruebas inequívocas no se remontan más allá de 50.000 años. Otros, fundados en dibujos geométricos de una cueva sudafricana, retrotraen la fecha dos decenas de millares de años más. Dentro del ámbito de las interpretaciones arqueológicas pueden inscribirse las económicas (*Second Nature: Economic Origins of Human Evolution*), con una base mucho más discutible. Van éstas desde las primerísimas expresiones de optimización de las estrategias de defensa, forrajeo y caza en grupo, con división del trabajo, hasta la revolución de la agricultura.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Barajas preparadas

Alicia y Benito juegan una peculiar partida con 14 cartas, que van del as de corazones al siete de corazones y del as al siete de picas. En la primera mano, Benito elige al azar un número de 1 a 7, y Alicia le da ese número de cartas. Benito levanta la última de las cartas que le han dado; su número determina cuántas serán las cartas que Alicia le ha de dar en la segunda mano (se considera que el as representa un 1). Benito, de nuevo, levanta la última carta; Alicia le da el correspondiente número de naipes, y así hasta el final. Alicia gana si la última carta repartida en alguna de las rondas es la última de las 14 y si es el as de picas. Benito gana en los demás casos.

Entrenémonos primero con el siguiente problema. ¿Puede Alicia preparar el mazo de antemano de modo que, sea cual sea la primera elección de Benito, la última carta que se levante sea el as de picas? Se ofrece una posible solución en las ilustraciones A, B, C, D y E.

Veamos ahora un problema claramente más difícil. Supongamos que Benito ordena todas las cartas con números mayores que cuatro (las cartas del 5 al 7 tanto de picas como de corazones). Entonces Alicia, sin mirar lo que ha hecho Benito, ordena los naipes restantes y los coloca en el mazo bajo las de Benito. ¿Puede todavía Alicia imponer su victoria?

He dejado para el final el problema más difícil. Supongamos que Benito toma siete cartas cualesquiera, menos el as de picas. Alicia puede observar lo hecho por Benito e insertar a su gusto las cartas restantes entre las de él, pero no cambiar su orden. Por ejemplo, si Benito ordena las cartas como se indica en la ilustración F, Alicia puede ganar el juego realizando las inserciones de cierta manera (que dejo al cuidado del lector). Ahora bien, ¿podrá Alicia ganar en todos los casos, cualquiera que sea la disposición de las cartas de Benito? Mi conjetura es que sí, pero no sé si hay demostración. Tal vez puedan ayudarme los lectores.

Solución del problema del mes pasado:

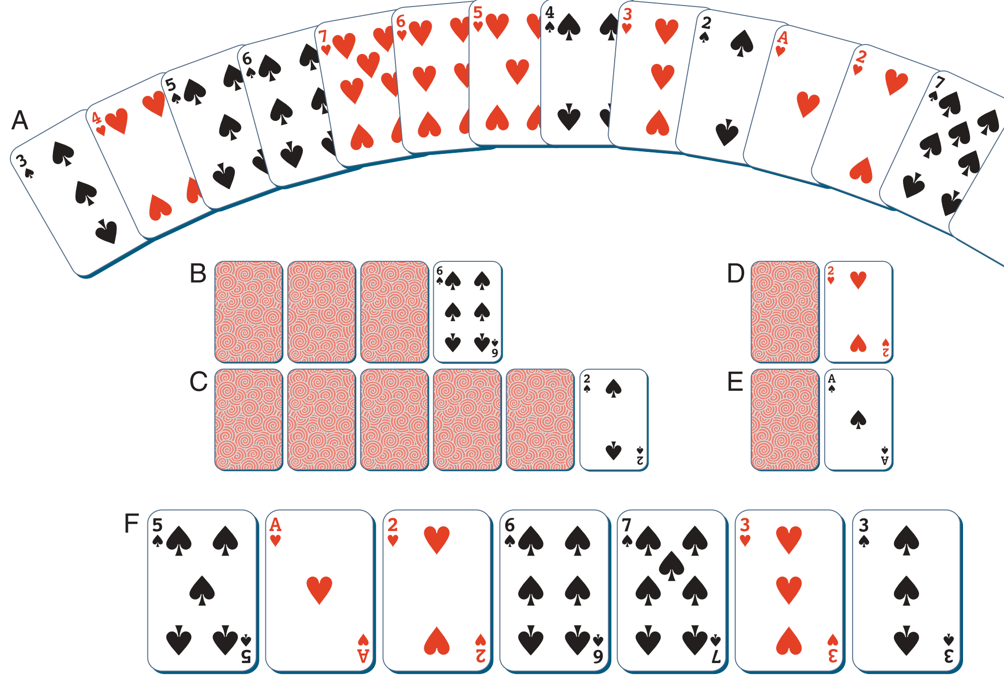
De las nueve mentiras que dijeron los testigos, al menos cinco han debido afirmar falsamente la inocencia ("el sospechoso no trafica"). El único supuesto que puede dar este resultado es que sí trafiquen los sospechosos 1, 4, 5, 7, 8 y 10, y el resto, no. Puede verse una explicación más detallada en www.investigacionyciencia.es

Corrección

En la solución del problema "Parada discrecional" (enero de 2002) el número de recorridos necesarios a través de BC y de CD es 12, no 11.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



ALICIA PUEDE GANAR el juego ordenando las catorce cartas como se indica (*A*). Supongamos que Benito elige el número 4. Alicia da cuatro cartas, dejando a la vista el seis de picas (*B*). A continuación da otras seis cartas, dejando a la vista el dos de picas (*C*). Da otras dos cartas más y deja a la vista el dos de corazones (*D*). Por último, da otras dos cartas, concluyendo con el as de picas (*E*). Ahora bien, ¿podrá Alicia crear otra ordenación de las 14 cartas que le asegure la victoria insertando naipes en la serie indicada en (*F*)?

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA PROTEOMICA EN EL HORIZONTE, por Carol Ezzell
Tras la genómica comienza a abrirse paso la proteómica. Se está dedicando particular esfuerzo a la catalogación de las proteínas y su interrelación con fines aplicados, en particular a la terapéutica.

PARASITISMO Y EVOLUCION, por Laurence D. Hurst y James P. Randerson
Dirigiendo las vidas sexuales de sus víctimas, la bacteria parásita Wolbachia *interviene en los procesos de especiación.*

CAUSAS Y TRATAMIENTO DE LA HALITOSIS, por Mel Rosenberg
La halitosis constituye una molestia social cuyas causas no acababan de desentrañarse. Se sabe ahora de la presencia de ciertas bacterias en la boca que segregan las moléculas responsables del mal aliento.

LA REALIDAD REALZADA, por Steven K. Feiner
Los informáticos están desarrollando sistemas que pueden ensanchar y enriquecer la visión del mundo.

DE LOS NUCLEOS ATOMICOS A LAS PROTEINAS, por Ricardo A. Broglia
Un modelo basado en las interacciones entre los nucleones permite individualizar las fases según las cuales una cadena lineal de aminoácidos se pliega hasta adoptar la estructura tridimensional característica de cada proteína.

ONDAS EN EL ESPACIO-TIEMPO, por W. Wayt Gibbs
LIGO, un observatorio para detectar ondas de gravedad, de refinada técnica y no exento de polémica, está a punto de entrar en funcionamiento.

¿OBRA DE ARTE AUTENTICA O GENIAL FALSIFICACION?, por Heike Bronk e Irmgard Müsch
Incluso para los historiadores del arte expertos en análisis estilístico resulta difícil determinar si un carísimo esmalte pintado data realmente del Renacimiento o se realizó en un taller del siglo XIX. *El análisis de su composición química aporta información adicional más objetiva.*

FISICA DE LOS MODOS DISCRETOS, por Luis M. Floría, José Luis Marín y Juan José Mazo
Se han detectado en ciertas redes superconductoras los modos discretos, unas soluciones dinámicas donde la energía permanece confinada. Se trata de la confirmación experimental de una teoría no lineal.

